



Taxonomia para a fabricação digital

oportunidades para a materialização arquitetônica

Bárbara Felipe



UFPB | UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CT | CENTRO DE TECNOLOGIA
PPGAU | PROGRAMA: Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Arquitetura e Cidade: Processo e Produto
LINHA DE PESQUISA: Projeto do Edifício e da Cidade
NÍVEL: Doutorado

TAXONOMIA PARA FABRICAÇÃO DIGITAL:

oportunidades para materialização arquitetônica

DISCENTE: Bárbara Felipe

ORIENTADOR: Carlos Nome

JOÃO PESSOA, PARAÍBA, BRASIL

2023

Bárbara Laís Felipe de Oliveira

TAXONOMIA PARA FABRICAÇÃO DIGITAL:

oportunidades para materialização arquitetônica

Tese de doutorado submetida ao Programa Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal da Paraíba – PPGAU/Brasil, sob a orientação do Professor Carlos Alejandro Nome da Silva, como os requisitos para a obtenção do título de Doutor em Arquitetura.

JOÃO PESSOA, PARAÍBA, BRASIL

2023

O48t Oliveira, Bárbara Laís Felipe de.
Taxonomia para fabricação digital : oportunidades
para materialização arquitetônica / Bárbara Laís Felipe
de Oliveira. - João Pessoa, 2023.
244 f. : il.

Orientação: Carlos Alejandro Nome da Silva.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Arquitetura - Taxonomia. 2. Materialização
arquitetônica. 3. Fabricação digital. 4. Processo de
projeto. 5. Materialidade. I. Silva, Carlos Alejandro
Nome da. II. Título.

UFPB/BC

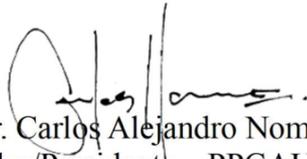
CDU 72-028.68(043)

Taxonomia para fabricação digital: oportunidades para materialização arquitetônica

Por

Bárbara Laís Felipe de Oliveira

Trabalho de pesquisa aprovado em 04 de julho de 2023



Prof. Dr. Carlos Alejandro Nome Silva
(Orientador/Presidente – PPGAU/UFPB)



Prof.ª Dr.ª Cristiana Maria Sobral Griz
(Avaliadora Interna- PPGAU/UFPB)

Prof. Dr. Felipe Tavares da Silva
(Avaliador Interno - PPGAU/UFPB)



Prof. Dr. Renato Fonseca Livramento da Silva
(Avaliador Externo – UFPB)



Prof.ª Dr.ª Regiane Trevisan Pupo
(Avaliadora Externa - UFSC)

João Pessoa-PB - 2023

Ao meu pai, Fernando Bastos (*in memoriam*).

*“Algumas vezes as mudanças acontecem na
marra.
Uma guilhotina afiada corta as nossas mãos, e
todas as rédeas escapam.
É o que pensamos ter acontecido, até que a gente
se dá conta de que nunca houve rédeas.
Ninguém monta na vida.
Brincamos de escolher,
brincamos de poder conduzir o destino.”*

Carla Madeira - Tudo é rio

*“I came to understand that
I can never forget where I came from.
My Soul should always look back
and wonder at the mountains
I had climbed and the Rivers
I had forged and the challenges which still
await down the road.
I am strengthened by that knowledge.”*

Maya Angelou - Letter to My Daughter

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e Zé Daniel pelo incondicional apoio emocional e incentivo durante esse percurso. Também à Fernando (*in memoriam*), meu pai/padrasto e primeiro professor, que sempre segurou a minha mão e me guiou nessa trajetória acadêmica. Deu certo, viu?

À Artur pelo amor, pela paciência, pelo companheirismo nessa caminhada juntos e por tornar lar tudo que esteve ao nosso redor. Também à Brisa, nossa cachorrinha, por nunca sair ao lado da minha cadeira, mesmo quando era um lugar arriscado de se ficar.

Ao meu orientador, Carlos Nome, pela dedicação, tempo investido e por sempre apoiar as empreitadas que essa parceria percorre há anos. Obrigada pelas orientações que contribuíram para a minha formação como arquiteta, professora e pesquisadora.

Ao meu orientador do período doutoral, Larry Sass, foi uma honra aprender e dividir os anseios do conhecimento. Obrigada por todo apoio no MIT, seu suporte foi inestimável para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Aos amigos de toda uma vida, desde a infância, das universidades e os amigos do mar ao bar. Mesmo quando estive distante vocês sempre estiveram presentes, oferecendo sorrisos e conversas que me impulsionaram a chegar neste momento. Em especial a Clara Ovídio, Daniel Andrade, Rafaela Balbi, Monique Lessa, Raíssa Camila e Eudes Raony, por essa rede de apoio que somos.

À UFERSA / BR, UFPB / BR, MIT / EUA e Fulbright *Comission Brazil* pelo suporte acadêmico e financeiro investido nessa pesquisa e no meu desenvolvimento pessoal. Muito obrigada a todos os professores, amigos e funcionários que me impulsionaram nessa jornada.

Aos meus familiares, em especial aos meus primos e primas, que sempre estiveram compartilhando todas as conquistas. Obrigada pelo carinho.

A todos os profissionais que trabalharam no enfrentamento à Covid-19, período atípico que essa pesquisa foi desenvolvida e afetou a todos nós.

RESUMO

A fabricação digital tem ganhado destaque tanto na indústria quanto na arquitetura, surgindo a partir do desenvolvimento de processos computacionais em softwares CAD e produção CAM. Inicialmente associada à produção de edifícios com formas complexas, essa abordagem tem sido adotada por escritórios de arquitetura em busca de sustentabilidade, redução de custos e otimização do tempo de construção. No contexto brasileiro, a maioria dos laboratórios de fabricação digital está concentrada no ambiente acadêmico, onde universidades, grupos de pesquisa e laboratórios exploram essa tecnologia como uma forma de projetar e fabricar modelos arquitetônicos. No entanto, a implementação dessas tecnologias enfrenta desafios, incluindo a necessidade de criar uma cultura de inovação, promover a transição do pensamento individual para o colaborativo e otimizar fatores econômicos e administrativos, como a redução de burocracia e custos de equipamentos. Neste cenário, surge a seguinte questão: como orientar os projetistas na materialização arquitetônica, por meio da fabricação digital? Como hipótese entende-se que a fabricação digital quando escolhida como meio de materializar um objeto, segue critérios na qual é possível identificar e estruturar uma taxonomia para a fabricação e produção de elementos arquitetônicos. O objeto de estudo é a relação entre o processo projetual e a materialização arquitetônica, por meio da fabricação digital, com um recorte nas técnicas de fabricação digital, maquinário desenvolvidos e os artigos publicados que discutem a temática até o presente momento. O objetivo da pesquisa é desenvolver uma taxonomia que possa ajudar no processo de projeto para a materialização arquitetônica utilizando a fabricação digital, além de permitir a catalogação de projetos concluídos. Para isso, esse trabalho segue a abordagem da “pesquisa construtiva” que se constituiu em três fases: compreensão, proposição e validação. A fase de compreensão abrange o referencial teórico e as revisões sistemáticas de literatura. A proposição envolve a síntese de taxonomias aplicáveis à arquitetura e o desenvolvimento da taxonomia para a materialização arquitetônica através da fabricação digital. E a fase de validação abrange etapas de validação interna e externa com atividades que tem o intuito de garantir a eficácia dos resultados obtidos. Assim, a taxonomia foi submetida a uma análise qualitativa de conteúdo, experimentações próprias e aplicações no catálogo de projetos que abordam a fabricação digital. A pesquisa foi desenvolvida na Universidade Federal da Paraíba (UFPB / BR) e no MIT / EUA (*Massachusetts Institute of Technology*) e teve como resultado principal a “Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura” (TDFab+Arch). A Taxonomia para Fabricação Digital (TDFab+Arch) é uma ferramenta que auxilia os projetistas na materialização arquitetônica através da fabricação digital e na catalogação de projetos concluídos. Foi aplicada no processo projetual de três modelos e na classificação dos projetos do catálogo do Homo Faber. Essa taxonomia é flexível, permitindo a incorporação de novos critérios e sua aplicação tanto na academia quanto em atividades profissionais. Ela foi transformada em uma ferramenta disponível online para análise de projetos, utilizando os critérios estabelecidos para filtrar e sistematizar os dados dos projetos analisados. Essa contribuição é significativa para a área, considerando a crescente expansão da fabricação digital e a relevância da pesquisa.

Palavras-chave: taxonomia, materialização arquitetônica, fabricação digital, processo de projeto, materialidade.

ABSTRACT

Digital manufacturing has gained prominence in both industry and architecture, emerging from the development of computational processes in CAD software and CAM production. Initially associated with the production of buildings with complex shapes, architecture firms have adopted this approach in search of sustainability, cost reduction, and optimization of construction time. In the Brazilian context, most digital fabrication laboratories are concentrated in the academic environment, where universities, research groups, and laboratories explore this technology to design and manufacture architectural models. However, implementing these technologies faces challenges, including creating a culture of innovation, promoting the transition from individual to collaborative thinking, and optimizing economic and administrative factors, such as reducing bureaucracy and equipment costs. The following question arises in this scenario: How to guide designers in architectural materialization through digital fabrication? The hypothesis is that digital fabrication, when chosen to materialize an object, follows criteria in which it is possible to identify and structure a taxonomy for the fabrication and production of architectural elements. The object of study is the relationship between the design process and architectural materialization, through digital fabrication, with a focus on digital fabrication techniques, developed machinery, and published articles that discuss the theme so far. The research aims to develop a taxonomy that can help design architectural materialization using digital fabrication besides allowing the cataloging of concluded projects. To this end, this work follows the "constructive research" approach, which consists of three phases: understanding, proposition, and validation. The comprehension phase encompasses the theoretical framework and systematic literature reviews. The proposition involves the synthesis of taxonomies applicable to architecture and developing the taxonomy for architectural materialization through digital fabrication. Furthermore, the validation phase comprises internal and external validation steps with activities intended to ensure the results' effectiveness. Thus, the taxonomy was submitted to qualitative content analysis, own experimentation, and applications in the catalog of projects that address digital fabrication. The research was developed at the Federal University of Paraiba (UFPB / BR) and MIT / USA (Massachusetts Institute of Technology) and had as its main result the "Taxonomy for Digital Fabrication applied to Architecture" (TDFab+Arch). The Taxonomy for Digital Fabrication (TDFab+Arch) is a tool that assists designers in architectural materialization through digital fabrication and cataloging of completed projects. It was applied to the design process of three models and the classification of projects in the Homo Faber catalog. This taxonomy is flexible, allowing the incorporation of new criteria and its application in academia and professional activities. It was transformed into an online tool for project analysis, using the established criteria to filter and systematize the data from the analyzed projects. This contribution is significant for the area, considering the growing expansion of digital fabrication and the relevance of the research.

Keywords: taxonomy, architectural materialization, digital fabrication, design process, materiality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Abordagem metodológica da pesquisa.....	34
Figura 2 – Etapas da pesquisa.....	36
Figura 3 – Processo de validação da pesquisa.....	39
Figura 4 – Etapas cíclicas e não cíclicas.....	44
Figura 5 – Comunicação entre as etapas.....	47
Figura 6 – Ciclo de Criatividade de Krebs.....	51
Figura 7 – Tipos de restrições projetuais.....	53
Figura 8 – Taxonomia de conceitos de arquitetura.....	57
Figura 9 – Modelo GOM.....	58
Figura 10 – Domínio de arquitetura.....	59
Figura 11 – Matrix de conceitos 3x3.....	60
Figura 12 – Etapas do processo de projeto.....	62
Figura 13 – Interação entre os requisitos.....	63
Figura 14 – Procedimento para escolha do material.....	64
Figura 15 – Parâmetros de entrada.....	65
Figura 16 – Curva de MacLeamy.....	66
Figura 17 – Triângulo da manufatura.....	68
Figura 18 – Soluções de engenharia.....	69
Figura 19 – Árvore de materiais.....	70

Figura 20 – Família e classes de processos de fabricação	71
Figura 21 – Etapas do processo de prototipagem rápida	73
Figura 22 – Métodos de produção automatizada	74
Figura 23 – Ciclo da prototipagem rápida	78
Figura 24 – Máquina e o G-Code.....	79
Figura 25 – Interação entre o processo	80
Figura 26 – Prototipagem rápida	81
Figura 27 – Hierarquia de critérios taxonômicos	82
Figura 28 – Taxonomia para classificação de projetos	84
Figura 29 – Taxonomia da construção espacial	85
Figura 30 – Interações para a produção de um objeto	87
Figura 31 – Relação entre objetivos e soluções de projeto	89
Figura 32 – Tipos de geometria.....	91
Figura 33 – Taxonomia para formas	91
Figura 34 – Exemplos de fechamento.....	92
Figura 35 – Detalhamento da superfície.....	92
Figura 36 – Espessura do objeto	92
Figura 37 – Seção transversal.....	92
Figura 38 – Panelização das superfícies	93
Figura 39 – Classificação das curvaturas	94
Figura 40 – <i>One Main Office</i>	95

Figura 41 – Contorno	96
Figura 42 – Empilhado <i>Stack</i>	96
Figura 43 – Esqueleto <i>Hash</i>	96
Figura 44 – Modulação.....	96
Figura 45 – Plate / Prato	96
Figura 46 – Airspace em Tokyo	97
Figura 47 – Relevo.....	97
Figura 48 – Contorno	97
Figura 49 – Formação	97
Figura 50 – Terminal Internacional de Yokohama	98
Figura 51 – Pavilhão do Japão	98
Figura 52 – Kerf Bending	98
Figura 53 – Superfícies planas geradas por <i>Fresh Press Modeler</i>	100
Figura 54 – Edifício Comercial Tamedia	101
Figura 55 – Sistema de encaixes	101
Figura 56 – Encaixe da estrutura.....	101
Figura 57 – Estrutura do edifício	101
Figura 58 – Estrutura da Digital Bamboo.....	102
Figura 59 – Conectores das peças fabricados em 3D.....	102
Figura 60 – Taxonomia de tipos de superfícies e conexões de edifícios.....	103
Figura 61 – Planificação das formas tridimensionais	104

Figura 62 – Tradução do desenho para a máquina de corte	105
Figura 63 – Eixo de passo ou <i>tool path</i> para encaixes.....	107
Figura 64 – Caminho externo	108
Figura 65 – Caminho interno	108
Figura 66 – Produto final	108
Figura 67 – RSLs e a lacuna	115
Figura 68 – Função da RSL2	116
Figura 69 – Desenvolvimento de taxonomia	126
Figura 70 – Visão geral do desenvolvimento da taxonomia	128
Figura 71 – N.º 01 Síntese dos critérios	129
Figura 72 – N.º 02 Síntese em três temas.....	130
Figura 73 – N.º 03 Síntese em vários temas	131
Figura 74 – N.º 04 Agrupamento por semelhança entre os critérios	131
Figura 75 – N.º 05 Distribuição em temas	133
Figura 76 – N.º 06 Distribuição em outros temas	134
Figura 77 – N.º 07 Distribuição em temas	135
Figura 78 – N.º 08 Checagem de similaridades e redundâncias	136
Figura 79 – N.º 09 Critérios em hierarquia	137
Figura 80 – N.º 10 Síntese dos temas em hierarquias	138
Figura 81 – Losango com critérios	139
Figura 82 – N.º 11 Proposição dos critérios no losango	142

Figura 83 – N.º 12 União de duas disposições taxonômicas	143
Figura 84 – N.º 13 União dos critérios em um losango.....	144
Figura 85 – N.º 14 Polígono com os critérios	145
Figura 86 – Matriz de relação para critérios	147
Figura 87 – N.º 15 Disposição dos critérios em um hexágono	148
Figura 88 – N.º 16 Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura.....	152
Figura 89 – Desenvolvimento da AC com a taxonomia.....	155
Figura 90 – Acesso a ferramenta	169
Figura 91 – Sumário – TDFab+Arch	169
Figura 92 – Tradução do texto	169
Figura 93 – TDFab+Arch O que é a ferramenta?	170
Figura 94 – TDFab+Arch Por onde começar?.....	171
Figura 95 – Template Seleção	172
Figura 96 – Template Informações do projeto	172
Figura 97 – Template Resumo.....	172
Figura 98 – Template Imagens e Vídeos	172
Figura 99 – Escala pequena.....	173
Figura 100 – Escala média	174
Figura 101 – Escala grande.....	174
Figura 102 – Escala extragrande	175
Figura 103 – TDFab+Arch Escala	176

Figura 104 – TDFab+Arch Categorias	177
Figura 105 – TDFab+Arch Formas para fabricação digital	178
Figura 106 – TDFab+Arch Tabela para Fabricação Digital	178
Figura 107 – TDFab+Arch Topologia da superfície	179
Figura 108 – TDFab+Arch Maquinário	180
Figura 109 – TDFab+Arch Tabela dos processos aditivos e subtrativos.....	181
Figura 110 – TDFab+Arch Tabela de Materiais.....	182
Figura 111 – Síntese da TDFab+Arch e visualização em galeria	183
Figura 112 – TDFab+Arch Visualização em tabela	184
Figura 113 – TDFab+Arch Visualização do tipo lista	184
Figura 114 – TDFab+Arch Visualização do tipo linha do tempo.....	185
Figura 115 – Modelo de Casa Nordestinha	190
Figura 116 – Simulação computacional	191
Figura 117 – Fresadora cortando as placas de compensado naval.....	192
Figura 118 – Montagem das peças.....	192
Figura 119 – Protótipo fabricado	192
Figura 120 – Eixo de passo	193
Figura 121 – Uniões	193
Figura 122 – TDFab+Arch CN Fresadora.....	194
Figura 123 – Síntese na TDFab+Arch.....	194
Figura 124 – Placa de metal no maquinário	195

Figura 125 – Início do corte	195
Figura 126 – Eixo de passo	195
Figura 127 – Peças em metal.....	196
Figura 128 – Protótipo em metal	196
Figura 129 – TDFab+Arch CN Jato d’água.....	197
Figura 130 – Síntese na TDFab+Arch.....	198
Figura 131 – Modelo para impressão	199
Figura 132 – Apoios produzidos pela máquina	199
Figura 133 – Processo de fabricação	199
Figura 134 – Finalização do protótipo	199
Figura 135 – Protótipo com suportes	200
Figura 136 – Secadora para retirar os suportes	200
Figura 137 – TDFab+Arch CN Impressora 3D	201
Figura 138 – Protótipo impresso.....	201
Figura 139 – Síntese dos critérios	201
Figura 140 – HF2 Empatia mapeada	205
Figura 141 – HF1 BANCAPAR.....	205
Figura 142 – TDFab+Arch Escala grande.....	206
Figura 143 – HF1 Patrimônio arquitetônico na palma da mão.....	207
Figura 144 – HF2 Uma base conceitual comum	207
Figura 145 – TDFab+Arch Escala pequena.....	208

Figura 146 – HF2 Fabricação artesanal de ladrilhos digitais	209
Figura 147 – HF2 Escultura Helix	209
Figura 148 – TDFab+Arch Processo de fabricação.....	210
Figura 149 – HF2 Lounge do Venture	211
Figura 150 – HF2 Estruturas funiculares	211
Figura 151 – TDFab+Arch Topologia das superfícies.....	212
Figura 152 – HF1 CoBLOgó	213
Figura 153 – TDFab+Arch Materiais.....	214
Figura 154 – HF2 Furetsu	215
Figura 155 – TDFab+Arch Uniões e materiais	216
Figura 156 – HF1 Uma cidade ambulante; único vs reprodutível.....	217
Figura 157 – TDFab+Arch Escala e Uniões	217
Figura 158 – HF2 360 Móveis.....	218
Figura 159 – TDFab+Arch Uniões e maquinário	219

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Critérios de construção	106
Quadro 2 – Protocolo de análise das RSLs	117
Quadro 3 – RSL Protocolo de revisão.....	119
Quadro 4 – Etapas de Fraunhofer ISST (2009).....	127
Quadro 5 – Categorias para taxonomia.....	141
Quadro 6 – Relação entre autores e critérios	149
Quadro 7 – Critérios e autores	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ficha técnica da <i>Instant house</i>	61
Tabela 2 – Relacionamento entre as categorias	157
Tabela 3 – Análise geral dos artigos da RSL 2.....	158
Tabela 4 – AC Escala.....	160
Tabela 5 – AC Formas para fabricação digital	161
Tabela 6 – AC Topologia da superfície	162
Tabela 7 – AC Maquinário	164
Tabela 8 – AC Materiais.....	165
Tabela 9 – AC Aspectos Projetuais	166

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Análise qualitativa de conteúdo
CAD	Desenho assistido por computador
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CN	Casa Nordestinha
DDT	Pensamento do projeto digital (“ <i>Digital Design Thinking</i> ”)
DDF	Grupo de pesquisa “ <i>Digital Design Fabrication</i> ” no MIT / EUA
EUA	Estados Unidos da América
FD	Fabricação digital
HF1	Catálogo do Homo Faber 1.0
HF2	Catálogo do Homo Faber 2.0
KCC	Ciclo da Criatividade de Krebs
LM+P	Laboratório de Modelos + Prototipagem da UFPB / BR
MFD	Projeto baseado no material de fabricação (“ <i>Material Fabrication Design</i> ”)
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> , em português “Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT)”
NBR	Norma Técnica Brasileira
PBD	Projeto baseado no desempenho (“ <i>Performance Based Design</i> ”)
PDT	Pensamento paramétrico para o projeto (<i>Parametric Design Thinking</i>)
RP	Prototipagem rápida
RSL	Revisão sistemática de literatura
RSLs	Revisões sistemáticas de literatura
TDFab+Arch	Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
V.E. e V.I.	Validação interna e Validação Externa.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	24
TEMA E PROBLEMÁTICA DA PESQUISA	25
RECORTE E OBJETO DE ESTUDO	28
QUESTÃO DE PESQUISA E HIPÓTESE	28
OBJETIVOS	29
INEDITISMO E ORIGINALIDADE	30
ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DA TESE	31
1. DIRETRIZES METODOLÓGICAS	33
1.1. FASES DA PESQUISA	33
1.2. ETAPAS DE PESQUISA	36
1.3. VALIDAÇÃO DA PESQUISA	38
2. REFERENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL	42
2.1. PROCESSO PROJETUAL DE ARQUITETURA	43
2.2. SISTEMATIZAÇÕES PARA OBJETOS ARQUITETÔNICOS	54
2.2.1. TAXONOMIAS PROCESSO PROJETUAL	56
2.2.2. TAXONOMIAS MATERIALIZAÇÃO ARQUITETÔNICA	67
2.2.3. TAXONOMIAS ETAPAS PROCESSUAIS	76
2.2.4. TAXONOMIAS GEOMETRIA	88
2.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	108
3. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA	113
3.1. REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA (RSL)	114
3.1.1. DESENVOLVIMENTO DAS RSLs	116
3.1.2. RESULTADOS DAS RSLs	122
3.2. ESTRUTURAÇÃO DA TAXONOMIA	125
3.3. ANÁLISE QUALITATIVA DE CONTEÚDO (AC)	154
3.4. FERRAMENTA TDFAB+ARCH	168
3.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	185
4. APLICAÇÃO DA TAXONOMIA PARA FABRICAÇÃO DIGITAL	187
4.1. EXPERIMENTOS – CASA NORDESTINHA	188
4.1.1. CN FRESADORA EM CNC	190
	XXII

4.1.2. CN CORTADORA COM JATO DE ÁGUA	195
4.1.3. CN IMPRESSORA 3D	198
4.2. CATÁLOGO DO HOMO FABER	202
4.2.1. HF ESCALAS E A GEOMETRIA	204
4.2.2. HF PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, SUPERFÍCIES E MATERIAIS	208
4.2.3. HF UNIÕES E MATERIAIS	214
5. DISCUSSÕES	219
<hr/>	
CONSIDERAÇÕES FINAIS	226
<hr/>	
LIMITAÇÕES DA PESQUISA	227
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	229
CONCLUSÕES	231
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	235
<hr/>	
GLOSSÁRIO	247
<hr/>	

INTRODUÇÃO

A fabricação digital tem desempenhado um papel fundamental no campo do projeto, indústria e da engenharia, proporcionando novas possibilidades para a criação e produção de objetos e estruturas. No entanto, o processo de fabricação digital envolve diversas etapas e decisões que podem ser complexas e desafiadoras para os projetistas. Nesse contexto, a aplicação de uma metodologia eficaz e sistemática se torna essencial para orientar o processo de projeto e classificação na fabricação digital. É nesse contexto que surge a Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch), uma ferramenta que busca proporcionar uma abordagem estruturada e integrada para a materialização de projetos, bem como para a organização e classificação de objetos fabricados digitalmente.

Este trabalho objetiva apresentar e explorar a aplicação da TDFab+Arch em projetos e na classificação de objetos fabricados digitalmente, analisando sua eficácia e relevância nesse contexto. Ao adotar a TDFab+Arch como guia, espera-se obter benefícios significativos, como a otimização do processo de projeto, a padronização da classificação e a promoção da colaboração e do compartilhamento de conhecimentos no campo da fabricação digital.

Essa pesquisa de doutorado foi desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal da Paraíba (UFPB / BR) e no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) nos Estados Unidos, com o apoio da Fulbright Commission Brasil. Durante o estágio doutoral no *Department of Architecture* no grupo de computação do MIT / EUA, a pesquisa expandiu para incluir as referências, métodos e experiências em laboratório nas tecnologias vinculadas à fabricação digital.

Tema e problemática da pesquisa

A pesquisa em questão tem como tema central a relação entre fabricação digital na materialização arquitetônica, a partir do uso de tecnologias de manufatura para transformar ideias em realidade durante o processo de projeto. O objetivo é desenvolver uma ferramenta para auxiliar os projetistas a materializar suas ideias, utilizando a fabricação digital. Para isso, foram estudados e caracterizados critérios e padrões recorrentes na fabricação de objetos arquitetônicos, a partir de sistematizações para otimizar o processo projetual.

A fabricação digital é uma área de pesquisa em constante evolução que se tornou cada vez mais importante para a indústria e a arquitetura nos últimos 15 anos. Ela emergiu na arquitetura a partir do desenvolvimento de processos computacionais em softwares CAD (Desenho assistido por computador ou *computer-aided design*) e produção CAM (Manufatura assistida por computador ou *computer-aided manufacturing*). Antes da crise financeira de 2008, a fabricação digital era associada principalmente à produção de edifícios com formas complexas para se destacarem globalmente, atendendo a um pequeno grupo. As tecnologias digitais permitiram a produção de edifícios com formas complexas que não seriam possíveis sem o desenvolvimento do maquinário adequado, como o caso do Guggenheim de Bilbao, projetado pelo arquiteto Frank Gehry, que utilizou tecnologias CAD/CAM no início dos anos 2000. Após a crise, houve uma mudança de paradigma na arquitetura, com uma crescente preocupação com a sustentabilidade. Alguns escritórios de destaque começaram a explorar as possibilidades de utilizar tecnologias para a modelagem, a fim de reduzir desperdício de material, custos e tempo, ao invés de projetar de forma "tradicional" (BORGES, 2016).

Na América Latina, a fabricação digital começou surgir a partir da queda dos custos de equipamentos e à disponibilidade de patentes, especialmente com a criação dos primeiros Fab Labs pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) no Brasil. Até o ano de 2018, foram identificados 117 laboratórios em atividade em 11 países da América do Sul, embora alguns estivessem desativados, com atividades suspensas ou em processo de reestruturação (SCHEEREN, 2022). No Brasil, a maioria dos laboratórios de fabricação digital estão ligados a instituições de pesquisa e universidades. Mas há desafios para a implantação dessas tecnologias, incluindo a criação de uma cultura de inovação, a transição do pensamento individual para o colaborativo e a otimização de fatores econômicos e administrativos, como a redução de burocracias e custos de equipamentos. Em geral, a maioria dos laboratórios de arquitetura usa a fabricação digital para explorar possibilidades de projeto e produção, fabricando modelos em escala para aprender novas ferramentas e rotinas de fabricação (BORGES, 2016).

Dentro desse contexto, a fabricação digital pode influenciar o modo que são solucionadas as demandas e problemas nos processos projetual de arquitetura e na fabricação das edificações. Mahfuz (1995) disserta que durante o processo de materialização arquitetônica, os conceitos de projeto e construção surgem, evidenciando a capacidade organizadora do ambiente humano e a importância dos materiais no processo de construção. Então, a partir da interpretação e organização das prioridades, a fabricação digital pode ser uma das respostas.

O autor também destaca que forma e matéria são dependentes e que um objeto não pode ser definido apenas por uma variável, mas deve incluir todos os conceitos que afetam o projeto. Estas variáveis são influenciadas pelo contexto em que se inserem, tal qual as limitações impostas por fatores sociais, culturais ou econômicos. Nesse processo de fabricação do objeto há múltiplos caminhos e técnicas construtivas para empregar no

processo projetual e de construção. Diversos trabalhos tentam desvendar um modo de sistematizar as fases ou critérios na escala processual ou na escala do micro do objeto, há ainda tentativas de estruturas gráficas que relacionam as variáveis e que sintetize todas essas relações (MAHFUZ, 1995).

Nesse sentido, há autores que buscam desvendar esse processo projetual influenciado por variáveis. O processo projetual pode ser posto tanto a partir de um olhar amplo para uma visão mais focada ou, bem como de um olhar focado para um objetivo mais abrangente. Por exemplo, o pesquisador Michael Ashby (2013; 2019) estudou a seleção dos materiais e seus atributos a partir das propriedades mecânicas (resistência à flexão, dureza etc.), as funções dos produtos (suportar carga, conter pressão, transmitir calor etc.), que estão sujeitos a restrições de uso ou de concepção (ASSUNÇÃO; COSTA; CÂMARA, 2013) e sistematizou esses dados em um *software* para auxiliar os projetistas. Por outro lado, Bax e Trum (2002; 1996) abordam os conceitos aplicáveis a arquitetura de maneira macro, no qual relaciona a variáveis do processo projetual. Há também os passos delineados por Peña e Parshall (2001) para a programação arquitetônica. Desse modo, dependendo do conceito do projeto, tais quais: materiais, modo de fabricação ou até a geometria, a forma de conceber o projeto será distinta. Então, continuamente reformula-se as etapas iniciais do projeto, desenvolvimento até a sua execução, seja isso na arquitetura, engenharia ou ainda no design (GALINARI; INO, 2004).

Esta tese mapeia o processo de projeto que utiliza a fabricação digital como meio para materializar peças, a partir de equipamentos como impressoras 3D e máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado). Além disso, sistematiza as informações em uma taxonomia que possa auxiliar os projetistas no uso da fabricação digital e servir como uma ferramenta para catalogar projetos concluídos, uma vez que os critérios estabelecidos são capazes de filtrar e sistematizar os dados dos projetos analisados.

Contudo, a taxonomia assume papel de apoio e guia aos projetistas que se iniciam na temática, buscando fabricar objetos a partir de equipamentos adequados. Tais equipamentos encontram-se em evidência, uma vez que proporcionam maior precisão, complexidade e personalização dos projetos, além de economia de tempo e materiais.

Recorte e objeto de estudo

A presente pesquisa tem como objetivo desenvolver uma taxonomia para orientar e catalogar projetos realizados por meio da utilização da fabricação digital. Nesse sentido, buscou-se identificar quais os critérios presentes nas taxonomias aplicáveis à arquitetura que abordam o processo projetual com a fabricação digital. O **objeto de estudo** da tese é a relação entre a materialização arquitetônica e o processo projetual, por meio da fabricação digital; com um **recorte** específico para técnicas de fabricação digital, maquinários desenvolvidos e os artigos publicados que discutem a materialização de objetos arquitetônicos até o presente momento.

Questão de pesquisa e hipótese

A pesquisa desenvolvida tem abordagem qualitativa e analisa taxonomias para identificar critérios aplicáveis no contexto da fabricação digital. Então, acredita-se que é possível elucidar os possíveis caminhos para a materialização arquitetônica a partir da fabricação digital, por meio da análise de objetos fabricados e artigos publicados.

Assim, tem-se a seguinte **questão de pesquisa**: Como orientar os projetistas na materialização arquitetônica, por meio da fabricação digital?. Desse modo, entende-se que a fabricação digital quando escolhida como meio de materializar um objeto, segue critérios e escolhas, na qual é possível identificar e estruturar em taxonomia para a fabricação e produção de objetos arquitetônicos (**hipótese da pesquisa**).

Objetivos

O objetivo **geral** deste trabalho é desenvolver uma taxonomia que possa auxiliar no processo de projeto para a materialização arquitetônica utilizando a fabricação digital, além de permitir a catalogação de projetos concluídos. Para alcançar tanto, os **objetivos específicos** estabelecidos foram:

- I. Identificar e analisar as técnicas de fabricação digital utilizadas na materialização arquitetônica;
- II. Analisar as características e potencialidades de diferentes classificações disponíveis na literatura científica para processos de fabricação digital de objetos arquitetônicos;
- III. Caracterizar os critérios que auxiliam os projetistas nas escolhas que envolvem a fabricação digital e que permitam a catalogação de projetos concluídos;
- IV. Sintetizar e validar a taxonomia para auxiliar no processo de projeto e na catalogação de projetos concluídos que utilizam a fabricação digital.

Ineditismo e originalidade

Esta tese se distingue pela sua contribuição original e inovadora para a literatura científica no campo da arquitetura e fabricação digital. A originalidade reside na proposição de uma ferramenta que tem como objetivo auxiliar os projetistas na materialização arquitetônica por meio da fabricação digital. Esta ferramenta representa uma contribuição original para o campo, uma vez que não há, na literatura científica, outra ferramenta com características semelhantes.

A ferramenta desenvolvida denomina-se “Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura” (TDFab+Arch) e tem por objetivo orientar projetistas no processo de materialização arquitetônica por meio da fabricação digital, utilizando critérios específicos que guiam o processo de projeto, levando em consideração tanto as possibilidades quanto as limitações dos projetistas, a partir das categorias e critérios que envolvem o processo.

Na construção dessa ferramenta, realizou-se duas revisões sistemáticas de literatura para identificar a lacuna da pesquisa, na qual até o momento, não existia na literatura científica uma estrutura sistemática que abrangesse o processo projetual, considerando a fabricação digital na arquitetura.

Então, para confirmar a lacuna, os artigos encontrados nas revisões foram submetidos a análise qualitativa de conteúdo de Krippendorff (2004), o que auxiliou na caracterização dos critérios recorrentes e assim sistematizar a Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura, baseado nesses critérios.

Em síntese, originalidade e ineditismo da tese estão relacionados à proposta de desenvolvimento de uma ferramenta que aborda aplicação de critérios para Fabricação

Digital na arquitetura, principalmente em relação à materialização dos projetos arquitetônicos. O desenvolvimento da ferramenta denominada “Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura” representa uma contribuição significativa para a área e um avanço para a literatura científica. A pesquisa é relevante porque a fabricação digital tem se mostrado cada vez mais importante na arquitetura, possibilitando a criação de estruturas complexas e personalizadas.

Organização e estrutura da tese

A tese está estruturada em cinco capítulos e as considerações finais. Inicia-se o trabalho com as diretrizes metodológicas empregadas para o desenvolvimento da ferramenta. No segundo capítulo, há o referencial teórico conceitual e os tópicos que abordam o processo projetual da arquitetura e sistematizações para objetos arquitetônicos, na qual inclui taxonomias para processo de projeto, materialização, etapas projetuais e geometrias e, o capítulo encerra-se com um tópico de considerações, com apontamentos gerais acerca dos tópicos desenvolvidos. O terceiro capítulo aborda-se o desenvolvimento da taxonomia, iniciando com as revisões sistemáticas de literatura, análise qualitativa de conteúdo e a ferramenta denominada: Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+arch).

O quarto capítulo aborda as discussões do processo de validação da ferramenta desenvolvida. Este capítulo engloba o processo de validação da ferramenta com a revisão sistemática da literatura, a análise qualitativa de conteúdo, o desenvolvimento da TDFab+arch, a aplicação no catálogo do *Homo Faber* e os experimentos realizados pela autora. No tópico que aborda a Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à

arquitetura também há a proposta do modelo inicial com as diretrizes metodológicas, a validação até o modelo final.

Por fim, apresenta-se o capítulo com as considerações finais, no qual há uma síntese das considerações abordadas ao longo da pesquisa. Esse capítulo está organizado em três itens principais: as limitações da pesquisa, sugestões para trabalhos futuros e as conclusões.

1. DIRETRIZES METODOLÓGICAS

Neste capítulo, serão apresentadas as diretrizes metodológicas utilizadas no desenvolvimento da ferramenta que visa orientar os projetistas na materialização de objetos por meio da fabricação digital e na catalogação de projetos concluídos. Serão abordadas as fases realizadas para identificar a lacuna na literatura científica referente às estruturas taxonômicas para processos projetuais na fabricação digital, bem como as etapas que envolveram as sistematizações dos critérios. Além disso, o processo de validação da "Taxonomia para Fabricação Digital" foi iniciado neste trabalho, seguindo as diretrizes metodológicas deste capítulo para auxiliar no desenvolvimento da taxonomia e garantir a eficácia da ferramenta.

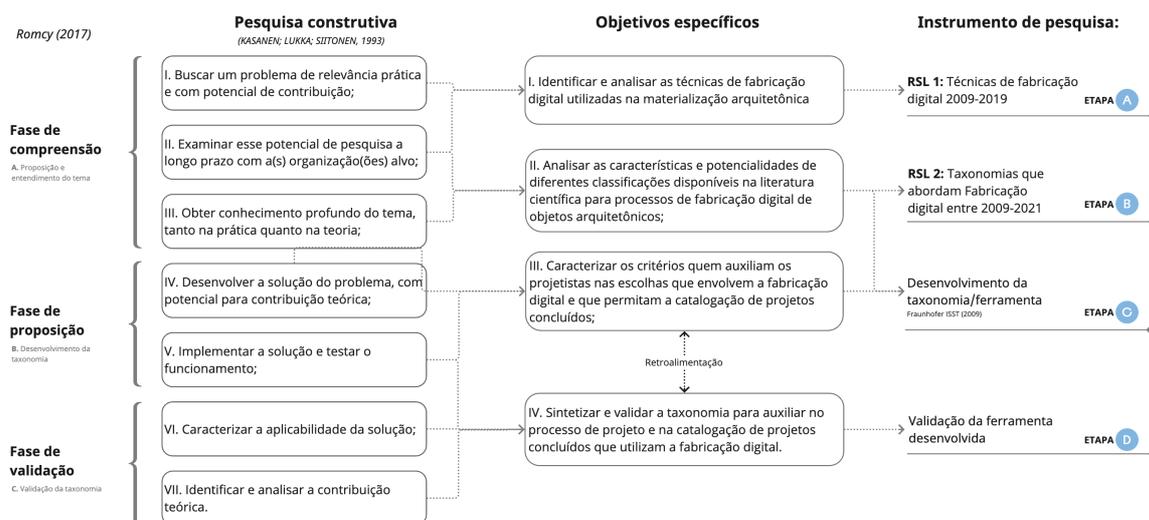
Esse trabalho de tese segue a abordagem metodológica da “pesquisa construtiva” proposta por Kasanen *et al.* (1993) e Lukka (2003), que se baseia na investigação de um problema a partir de uma indagação e na proposição de uma solução. Assim, a questão de pesquisa que guia o trabalho é a seguinte: “como orientar os projetistas na materialização arquitetônica por meio da fabricação digital?”.

1.1. Fases da pesquisa

A abordagem metodológica foi dividida em três fases: compreensão, proposição e validação (ROMCY, 2017). Essas fases foram relacionadas com as etapas da pesquisa construtiva (KASANEN; LUKKA; SIITONEN, 1993; LUKKA, 2003) e com os objetivos específicos da tese.

Além disso, elaborou-se instrumentos de pesquisa para cada fase e relacionou-se com as etapas A, B, C e D. Na pesquisa construtiva há um ciclo contínuo de planejamento, ação, observação e reflexão que integra a teoria e prática. A Figura 1 ilustra a relação entre as fases, os objetivos, instrumentos e as etapas.

Figura 1 – Abordagem metodológica da pesquisa



Nota: Para uma melhor visualização da imagem, recomenda-se a verificação do código QR (*qr code*), que pode ser escaneado por meio de dispositivos móveis com câmera e acesso à internet ou pelo link que está na palavra “acesso”.

[acesso](#)



Fonte: Autoria própria

A primeira fase da pesquisa é a **compreensão**, que por sua vez é composta por duas etapas (A e B). Estas auxiliam a responder aos objetivos específicos I e II da tese, conforme apresentado no item 3.1. Na “Etapa A” foi realizada uma revisão sistemática de literatura (RSL 1) para identificar a lacuna presente na literatura científica e analisar as técnicas de fabricação digital utilizadas na materialização arquitetônica. Desse modo, a “Etapa B”, é um aprofundamento do resultado encontrado na etapa anterior que,

identificou que não há uma estrutura sistematizada (taxonomia) que aborde todos os passos do processo projetual para fabricação digital.

Dessa maneira, nesta segunda etapa foram analisadas as características e potencialidades de diferentes estruturas taxonômicas para fabricação digital (RSL2) e, à medida que foram sendo encontradas estruturas taxonômicas para fabricação digital, verificou-se que havia uma influência direta no desenvolvimento da taxonomia e na identificação dos critérios. Este influxo de informações acabou resultando no desenvolvimento da “Etapa C”. Dessa forma, as etapas B e C foram realizadas em paralelo.

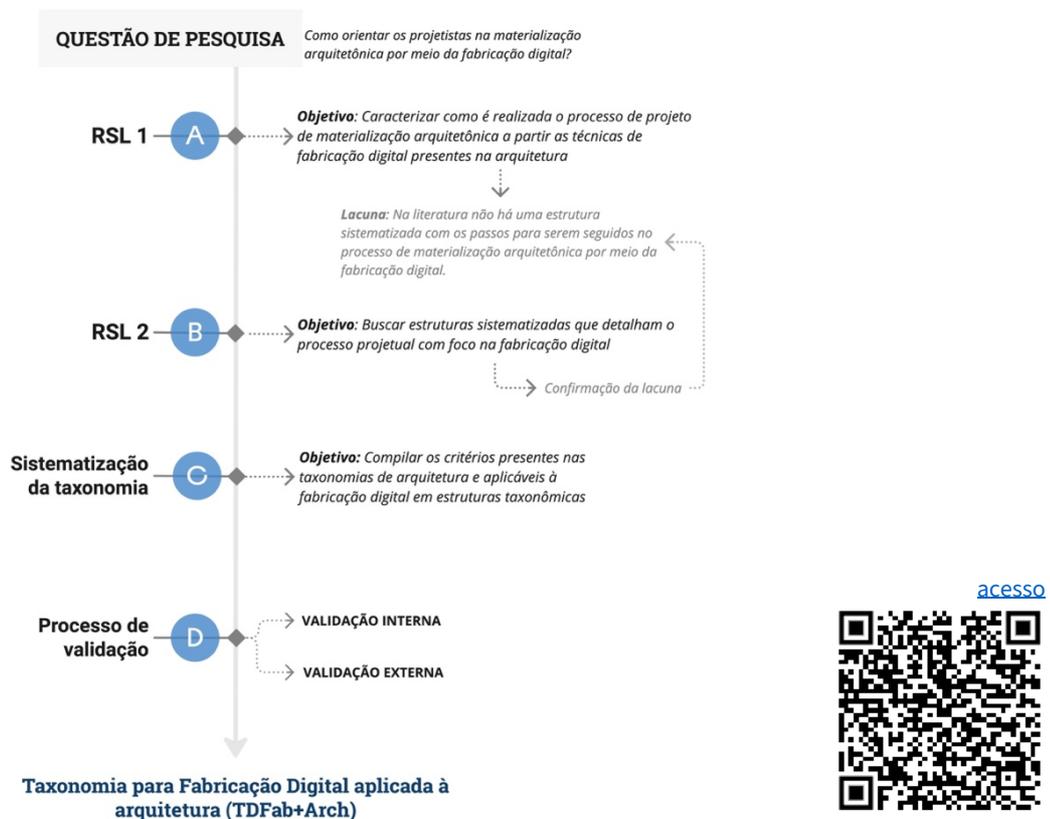
Na fase seguinte, **proposição**, seguiu-se as recomendações de Kasanen *et. al* (1993) para desenvolver, implementar e testar a solução proposta para o problema em questão (passo IV e V da pesquisa construtiva). Essa etapa está diretamente relacionada com o objetivo específico III que trata de "caracterizar os critérios quem auxiliam os projetistas nas escolhas que envolvem a fabricação digital e que permitam a catalogação de projetos concluídos". Para alcançar esse objetivo desenvolveu-se a taxonomia e a ferramenta como instrumento de pesquisa, presente no item 3.2 e detalhada na etapa C da abordagem metodológica.

Na última fase, a “Etapa D”, foi iniciado o processo de **validação**. Esta etapa objetivou sintetizar e testar a ferramenta proposta (objetivo específico IV), que havia sido desenvolvida na fase anterior. À medida que a ferramenta foi sendo desenvolvida, houve uma retomada e refinamento dos caracterização dos critérios da fase de proposição. Então, o processo de validação realizou experimentos com o intuito de consolidar, testar e refinar a estrutura da ferramenta. A partir disso foi possível confirmar a sua eficácia para auxiliar os projetistas nas escolhas e na catalogação de projetos concluídos que utilizam a fabricação digital.

1.2. Etapas de pesquisa

A pesquisa desenvolvida foi dividida em quatro etapas identificadas como A, B, C e D. Cada etapa foi definida com objetivos próprios e dependentes, com o intuito de proporcionar uma progressão coerente ao longo do desenvolvimento da pesquisa. Dessa forma, ao concluir uma etapa, a pesquisa avançou para a próxima, seguindo a progressão previamente definida. Essa divisão do processo de pesquisa foi ilustrada na Figura 2 que permitiu uma organização dos objetivos e a progressão de cada etapa do projeto como um todo.

Figura 2 – Etapas da pesquisa



Fonte: Autoria própria

Na **etapa A** da pesquisa, conduziu-se a revisão sistemática de literatura (RSL 1) de modo exploratório para responder à questão de pesquisa relacionada ao processo de projeto com o uso das técnicas de fabricação digital na arquitetura (IWAMOTO, 2009). Como resultado, identificou-se que, embora existam critérios recorrentes na literatura, não há uma estrutura sistematizada que aborde todos os passos do processo projetual.

Na etapa seguinte, a **etapa B**, foi realizada outra revisão sistemática de literatura (RSL 2) com o objetivo de encontrar estruturas taxonômicas consolidadas que abordassem os critérios necessários para o processo projetual com foco na fabricação digital. A RSL 2 teve um papel fundamental na tese: inicialmente, evidenciou a inexistência de estruturas taxonômicas para auxiliar nos processos projetuais da fabricação digital (que foi uma lacuna apontada pela RSL 1), consolidou o universo de estudo da tese (artigos encontrados na RSL 2) que foram utilizados no processo de validação pela análise qualitativa do conteúdo (conforme o item 3.3 da tese), e, por fim, ajudou na identificação dos critérios recorrentes dos processos projetuais para o desenvolvimento da taxonomia.

Após a definição da lacuna, a pesquisa avançou para a **etapa C**. Nessa etapa, os critérios identificados como recorrentes, conforme o item 2.2, foram utilizados como embasamento do referencial teórico e conceitual na construção da taxonomia. Nessa etapa, iniciou-se também o processo cíclico e contínuo da validação das estruturas taxonômicas propostas. Então à medida que as taxonomias foram sendo elaboradas, também se realizou indagações retóricas sobre a eficácia e as possíveis aplicações da em projetos concluídos, como ferramenta para orientar os projetistas ou ainda como possibilidade de catalogar acervo de projetos que utilizaram a fabricação digital. Esse desenvolvimento transcorreu até a 16ª versão da taxonomia, que originou a Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch), descrito no item 3.2. O

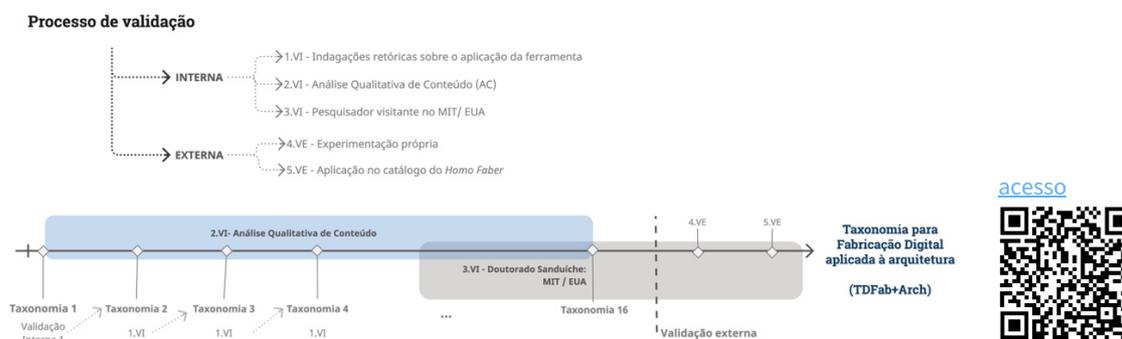
processo de validação foi iniciado nesta tese e apoiado pela análise qualitativa do conteúdo (fruto do universo de estudo da RSL 2), na qual os critérios das taxonomias propostas foram verificados nos artigos publicados na literatura científica, se estavam coerentes e agrupados corretamente.

Na última fase da abordagem metodológica, denominada **etapa D**, iniciou-se o processo de validação da TDFab+Arch, aplicando a taxonomia em experimentos, como um guia do processo de projeto e como ferramenta para catalogar projetos concluídos. Esse processo de validação, nesta tese, contou com dois tipos de validação: interna e externa. Na primeira, foram conduzidos experimentos internos durante o desenvolvimento das taxonomias com o intuito de garantir a eficácia dos resultados obtidos, visando sua aplicação na validação externa. Na validação externa, a ferramenta foi submetida a experimentações próprias e aplicada em um catálogo de projetos que abordam a fabricação digital, com o objetivo de validar sua eficácia, seguindo as recomendações de Campbell e Stanley (1963).

1.3. Validação da pesquisa

O processo de validação da ferramenta que resulta na Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura - TDFab+Arch, iniciou nessa tese e, submeteu a taxonomia à experimentos para avaliar a sua eficácia. Desse modo, essa fase se dividiu em dois tipos: o processo de validação interna (VI) e o processo de validação externa (VE), totalizando cinco etapas para esse processo. Sendo, a validação interna composto por três etapas e duas etapas compõem a validação externa (Figura 3).

Figura 3 – Processo de validação da pesquisa



Fonte: Autoria própria

A **primeira** etapa da validação interna ocorreu em conjunto com a proposta da taxonomia, sendo denominada de 1.VI. Durante essa etapa, que abrange todo o processo de desenvolvimento das taxonomias, foram realizadas perguntas e reflexões no Laboratório de Modelos + Prototipagem (LM+P /UFPB). Essas indagações avaliaram se a estrutura proposta seria capaz de auxiliar os projetistas e catalogar projetos concluídos. Além disso, foram levantadas questões sobre a facilidade de compreensão e acesso por parte dos projetistas aos diversos critérios presentes na taxonomia. Também foi discutido como seria o processo de fabricação digital caso o usuário escolhesse um dos critérios disponíveis. Então, no processo contínuo dessas indagações retóricas sobre a aplicação da ferramenta, gerou questionamentos sobre a aplicabilidade dela. Dessa maneira, a cada questionamento não respondido, uma nova taxonomia foi desenvolvida, conforme dissertado no item 3.2.

Na **segunda** etapa de validação interna (2.VI) da pesquisa, realizou-se a análise qualitativa de conteúdo (AC) em paralelo à construção da taxonomia. O objetivo da AC foi validar e refinar a estrutura taxonômica proposta por meio da análise dos artigos encontrados na RSL 2. Através da análise, identificou-se os critérios recorrentes, as

conexões e pode-se agrupá-los em categorias mais amplas com critérios mais específicos. O reordenamento dos critérios em categorias também foi realizado, após confrontá-los com a literatura científica. Com isso, a validação auxiliou no desenvolvimento, refinamento e na representação gráfica, conforme o item 3.3.

Por fim, a **terceira** etapa da validação interna (3.VI) da presente pesquisa foi influenciada pelo período em que esta foi desenvolvida no MIT, nos Estados Unidos. Durante o período de estudo na universidade, a autora teve acesso a outros componentes curriculares, literatura científica e conversas com professores da área de tecnologia da arquitetura, computação e fabricação digital. Esse ambiente proporcionou um aprofundamento teórico e prático, que permitiu o desenvolvimento da taxonomia e a realização de experimentos nos laboratórios de fabricação digital, parte de uma etapa subsequente processo de validação externa. A convivência com o orientador acadêmico do MIT, o professor Larry Sass, foi fundamental para buscar e discutir modelos existentes sobre a influência da taxonomia no processo de fabricação digital. Como resultado dessas discussões e validações, ocorreu diversas mudanças na geometria da taxonomia e no modo de executá-la. A taxonomia foi flexionada de quadriláteros para um círculo com eixos cruzando a figura, conforme descrito no item 3.2. Esse processo de validação interna proporcionou um refinamento na taxonomia, tornando-a mais consistente com as práticas de fabricação digital e mais alinhada com a literatura científica da área.

Ao final do processo de validação interna e antes de iniciar a validação externa, a taxonomia foi transformada em uma ferramenta *online* com o objetivo de torná-la mais acessível (item 3.4). Essa abordagem permitiu maior aplicabilidade e facilitou a utilização da TDFab+Arch por parte dos projetistas e afim de divulgar o conhecimento obtido e registrado nessa base de dados.

O processo de validação externa foi dividido em duas etapas. Na primeira

atividade da validação externa e a **quarta** etapa do processo de validação (4.VE), foram conduzidos experimentos com o projeto inspirados na Casa Nordeste - fabricados no maquinário disponível nos laboratórios do MIT / EUA e da UFPB / BR (conforme o capítulo 4). Os experimentos foram fabricados por meio de processos aditivos e subtrativos e documentados na Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch). O objetivo dessa etapa foi testar se os critérios estabelecidos estavam alinhados com o que é considerado durante o processo de projeto e se tinham relevância no contexto da fabricação real de elementos. Os resultados indicaram que os critérios eram aplicáveis ao processo de projeto e podem ser utilizados como um modo de catalogar projetos concluídos provenientes da fabricação digital.

Por sua vez, a **quinta** etapa de validação, sendo também a segunda etapa da validação externa (5.VE), teve como foco a utilização da TDFab+Arch nos projetos concluídos no catálogo da Homo Faber 1.0 e 2.0, conforme apresentado no item 4.2 da tese. O objetivo dessa etapa foi avaliar a eficácia da TDFab+Arch na classificação dos projetos materializados, com o intuito de verificar se os critérios – categorias e critérios - estabelecidos são coerentes com o que foi sistematizado. Através dessa validação, foi possível classificar os projetos presentes no *Homo Faber* e observar quais critérios da TDFab+Arch foram mais recorrentes.

Durante a pesquisa houve uma reflexão sobre a materialização da arquitetura no contexto da fabricação digital. Os resultados obtidos nas etapas foram discutidos criticamente com o intuito de tirar conclusões e indicar possíveis direções para pesquisas futuras.

2. REFERENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que sustenta a pesquisa e o desenvolvimento da ferramenta que estabelece uma relação entre a fabricação digital e a materialização arquitetônica. São abordadas temáticas relevantes para a tese, tais como o processo projetual de arquitetura, a discussão sobre o *Design Thinking* como uma abordagem de projeto, o pensamento sistêmico aplicado às etapas de projeto e as taxonomias pertinentes. O item 2.1, que é o primeiro deste capítulo aborda os métodos projetuais utilizados nos processos de projeto arquitetônico. Apresentam-se os conceitos e teorias que envolvem a criação de projetos arquitetônicos, desde a concepção até a materialização final da obra. Além disso, discutem-se as novas linhas de pensamento de projeto que surgem quando as tecnologias digitais são aliadas ao processo, podendo ser centradas no material, no desempenho ou no usuário.

O item 2.2 que é o seguinte discute as sistematizações presentes na literatura para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos e sua relação com as etapas projetuais. São apresentadas as taxonomias encontradas na literatura que têm como foco o processo projetual, a materialização, as etapas processuais e a geometria. O objetivo dessa análise é garantir que o resultado do processo de projeto atenda a critérios e restrições estabelecidos.

Por fim, o item 2.3 é o final, no qual apresenta uma síntese do referencial teórico utilizado para o desenvolvimento da pesquisa. Destaca-se a análise da aplicação dos métodos projetuais e sistematizações na relação entre fabricação digital e materialização arquitetônica, bem como a importância das taxonomias para a compreensão dos processos de fabricação digital na arquitetura.

Esse capítulo é fundamental para a compreensão dos fundamentos teóricos que sustentam a pesquisa e o desenvolvimento da ferramenta, bem como para estabelecer os principais conceitos e teorias que serão utilizados ao longo do trabalho.

2.1. Processo projetual de arquitetura

Este item trata dos métodos e conceitos envolvidos no processo projetual arquitetônico, apresentando as novas possibilidades trazidas pelas tecnologias digitais e as metodologias mais utilizadas. A concepção e materialização da obra são fases essenciais para esse processo, que requerem compreensão dos métodos e teorias envolvidos.

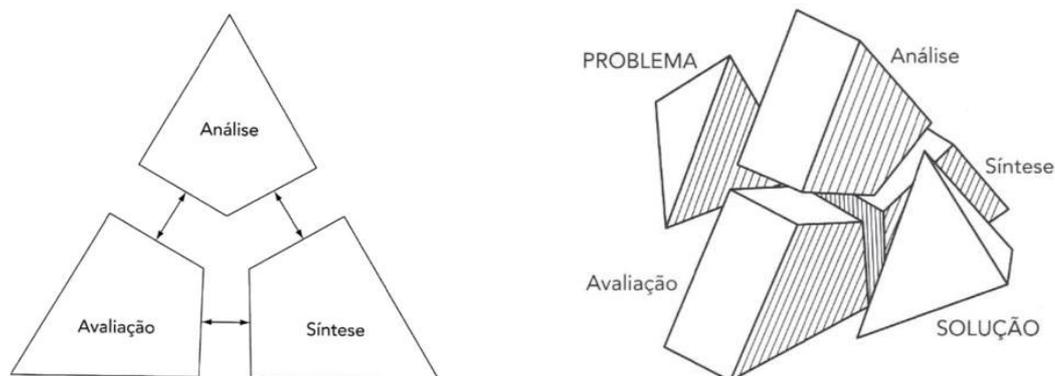
O debate sobre o processo projetual para conceber espaços envolve diversas variáveis. Kowaltowski *et al.* (2011) disserta que o olhar do projetista deve ser consciente e pragmático para desenvolver soluções inovadoras, evitando depender do acaso. É preciso compreender as abordagens científicas e produtivas para fabricação digital e entender as questões técnicas e sociais, bem como aspectos econômicos.

Por outro lado, Lawson (2011) disserta que o processo de projeto é guiado pela experimentação e intuição, envolvendo a geração de ideias por meio de um processo não linear e iterativo. Ele destaca ainda a importância da abordagem colaborativa ao projeto, envolvendo não apenas o projetista, mas também os usuários e outras partes interessadas no processo. Ele destaca que o projeto é um processo criativo e complexo, que passa por diversas etapas e decisões, incluindo definir o problema, gerar ideias, selecionar e desenvolver soluções, avaliar e comunicar resultados. O autor explora fatores que afetam o processo de projeto, como a experiência, intuição, criatividade e

cultura, destacando a importância de conhecer bem os usuários e o contexto em que o projeto será construído.

Lawson (2011) disserta que existem três etapas que compõem o processo de desenvolvimento de soluções para projetos: análise, síntese e avaliação. Na etapa de análise, é feita a contextualização do problema e coleta de informações relevantes. Na etapa de síntese, são geradas tentativas para solucionar o problema e iniciada a produção de soluções adequadas. Por fim, na etapa de avaliação, as soluções são criticadas e refinadas. O autor sugere que essas etapas sejam realizadas de forma cíclica, ao contrário das abordagens mais comuns, como a linear ou sequencial adotadas por outros pesquisadores (Figura 4).

Figura 4 – Etapas cíclicas e não cíclicas



Fonte: Lawson (2011)

A disposição das etapas em um formato cíclico, auxilia o entendimento do projeto e guiam na ponderação da informação dada ao projetista, na qual ele classifica hierarquicamente quais restrições e oportunidades devem ser seguidas primeiro. Então, a escolha de uma solução muito cedo pode dificultar o entendimento das variáveis que porventura surgirão no caminho e, talvez gerar uma reavaliação das decisões tomadas (KOWALTOWSKI *et al.*, 2011).

Por outro lado, Cross (2011) aborda que o processo de projeto é uma atividade cognitiva complexa que requer várias habilidades e estratégias para resolver problemas, além de colaboração multidisciplinar e pesquisa. Ele destaca a importância de soluções inovadoras que atendam às necessidades dos usuários e a reflexão sobre a prática como parte integrante do processo de projeto. É importante considerar o contexto do projeto, incluindo a vivência, valores e atitudes do projetista, e adotar uma abordagem flexível e iterativa. A experimentação e a prototipagem são essenciais para a comunicação de ideias complexas e avaliação das soluções propostas pelos usuários finais.

Donald Schon (2000) destaca a importância da reflexão sobre a prática no processo de projeto, a partir da aprendizagem dos projetistas com suas experiências para criar soluções inovadoras. Esse processo de aprendizagem defende que os envolvidos, devem refletir criticamente sobre suas práticas e questionar seus pressupostos. O autor destaca a importância da habilidade técnica do projetista, mas enfatiza que o conhecimento técnico deve ser combinado com a reflexão crítica que possibilitem criar soluções significativas.

Diversos autores destacam a importância das decisões tomadas nas primeiras fases do projeto, as quais se torna uma das escolhas mais importantes por guiar o que será desenvolvido. Hershberger (1999) destaca que é na fase de programação arquitetônica que ocorre a definição da forma e a avaliação dos possíveis problemas do projeto. Essa etapa é fundamental para avaliar decisões e reduzir erros futuros. Mascaró (2010) acrescenta que uma boa definição de critérios reduz as chances de erros ao longo do desenvolvimento do projeto e diminui os custos de retrabalho. Por sua vez, Faatz (2009) ressalta que é preciso investir tempo e esforço nas primeiras fases do projeto e isso reduzirá os equívocos nas etapas posteriores e o custo em correções e modificações.

No mesmo sentido, Peña e Parshall (2001) apresentam um método para

desenvolver as decisões nas primeiras fases do projeto a partir de cinco etapas sequenciais. A primeira etapa é estabelecer as metas do cliente, o que ele deseja obter e por que é importante; seguidas por coletar fatos e informações relevantes para o projeto. A terceira etapa é definir os conceitos que serão usados para alcançar as metas estabelecidas. A quarta etapa é identificar as necessidades em termos de recursos e espaços necessários, bem como o nível de qualidade desejado. A quinta etapa é identificar os problemas e condicionantes que afetam o projeto e definir a direção que o projeto deve seguir. A proposta estabelece quatro termos de classificação, que são função, forma, economia e tempo, que devem ser interligados com as cinco etapas acima mencionadas. Isso permite que o projetista obtenha uma análise abrangente e detalhada dos objetivos, antes de iniciar o desenvolvimento do projeto em si.

Lawson (2011) destaca a importância das motivações, crenças e valores dos projetistas na definição dos "princípios condutores" que guiam o processo de projeto, desde a geometria até a materialização. É necessário compreender todos os critérios envolvidos, para identificar quais auxiliam o projetista no desenvolvimento do projeto. Essa análise ajuda a identificar critérios e definir limites em todas as fases do projeto de forma clara e eficaz. Assim, quando a solução é proposta, ela deverá satisfazer a metas e objetivos enumerados nas primeiras fases do processo de projeto.

A partir disso, necessita-se que a solução acompanhe um custo aceitável, durabilidade e fatores estéticos; atendendo ao desempenho estrutural e ambiental das edificações. Diante disso, ao pensar na solução, o projetista precisa prever e antecipar decisões, a fim de reduzir dificuldades e incertezas no projeto. Nessa busca pela solução que satisfaça metas e limitações, o projetista tem que escolher qual será a mais adequada ao projeto (KOWALTOWSKI *et al.*, 2011). Como resultado, busca-se entender como seriam tomadas decisões para a materialização do projeto de arquitetura, por

meio das técnicas de fabricação digital.

Outro fator que assiste na integração é o nível de comunicação entre os agentes envolvidos (projetistas, arquitetos, usuários e clientes). O sucesso da articulação das decisões depende da qualidade e frequência da comunicação. Com isso, as deficiências detectadas podem ser levadas à revisão das decisões tomadas nas etapas anteriores e à uma redefinição das metas e restrições do projeto (Figura 5).

Figura 5 – Comunicação entre as etapas



Fonte: KOWALTOWSKI et al (2011).

A eficiência da comunicação auxilia na conexão entre as fases do processo decisório e serve como meio de registro para o processo de projeto. Na qual, a informação é transferida por meio de modelos, especificações e anotações (KOWALTOWSKI *et al.*, 2011; MOZOTA, 2003).

Ao adicionar novas tecnologias para a materialidade arquitetônica, como a fabricação digital, os métodos e o processo de projeto precisam ser repensados. Kalay (2004) disserta que a caracterização da informação é um meio que permite transferir as ideias, informações e mensagens entre diferentes partes e associadas a esse processo. O grau de eficiência na comunicação gera um impacto direto no processo de projeto, assim é importante ter clareza nas ideias e nos processos.

Ainda nesse sentido, há autores que inserem a tecnologia no pensamento do processo projetual. As teorias de projeto apoiadas no âmbito digital estão em constante evolução, dependem do contexto e das necessidades de cada projeto específico. Elas podem ser centradas nas necessidades do usuário, dos materiais disponíveis, das técnicas para projetar ou ainda no desempenho da edificação.

O pensamento do projeto digital (ou DDT “*digital design thinking*”) é uma abordagem de projeto que se concentra no uso de tecnologias digitais para desenvolver soluções criativas e inovadoras para problemas de projeto. A abordagem inclui o uso de ferramentas digitais, como software de modelagem 3D, simulação de desempenho e algoritmos para projetos paramétricos para explorar uma ampla gama de opções de formas. Na qual, objetiva permitir que os projetistas desenvolvam soluções mais eficazes e sustentáveis por meio da integração de tecnologia e projeto. Essa teoria enfatiza a importância da colaboração e da interdisciplinaridade, permitindo que os projetistas trabalhem em equipe com outros profissionais, como engenheiros e cientistas, para desenvolver soluções mais eficazes.

O DDT transforma o modo de pensar dos projetistas sobre o processo de fabricação e produção. A abordagem sugere cinco classes para o DDT: CAD, formação, geração, desempenho e modelos integrados. Para entender os processos de projeto em cada modelo, a autora propõe uma estrutura composta por Representação e Conteúdo formal, Geração, Avaliação e Desempenho (“*representation*” e “*formal content*”, “*Generation*”, “*evaluation*”, e “*performance*”, respectivamente). Essa estrutura auxilia em novas abordagens de projeto, como morfogênese e formação paramétrica, com o "modelo composto integrado" sendo o ideal (OXMAN, 2006).

No pensamento paramétrico aplicado ao projeto (ou PDT – *Parametric Design Thinking*), utiliza-se a parametrização como metodologia para explorar e criar soluções

de projeto. A partir da definição de parâmetros, como dimensões, materiais e requisitos de desempenho, são criados modelos digitais que permitem visualizar as diferentes possibilidades. Essa abordagem permite explorar e otimizar as opções a partir das variáveis inseridas e as ferramentas paramétricas permitem refletir as modificações e gerar soluções digitais para a análise do projetista. Então, o processo de projeto paramétrico depende da definição de relações e da habilidade do projetista em considerar essa etapa como uma parte integrante do projeto (WOODBURY, 2010).

Ao focar na materialidade do projeto, tem-se o pensamento do baseado no Material (ou MFD – “*Material Fabrication Design*”) que considera o material e o processo de fabricação como partes essenciais do projeto. O MFD não apenas um meio para produzir um objeto, ao contrário é um modo de explorar e criar estruturas, através da integração de propriedades e comportamentos materiais nos projetos. Essa perspectiva melhora as relações entre forma, estrutura e material quando envolvida na lógica de fabricação e tecnologias computacionais. Essa perspectiva é utilizada na arquitetura e design, bem como em áreas de pesquisa científica, como a biologia e a nanotecnologia (OXMAN, 2012, 2015, 2017).

No mesmo sentido, para auxiliar a MFD, tem-se a fabricação baseada no projeto “*Fabrication Based Design*” de Oxman (2015). Esse pensamento enfatiza a fabricação digital como parte essencial do processo de projeto, utilizando tecnologias computacionais para produzir objetos e adaptados às necessidades específicas. Aborda a união entre os materiais e processos de fabricação à parâmetros, a fim de ter uma produção mais eficaz. Esta é utilizada nas áreas da arquitetura, design de produtos, moda, design de interiores e pesquisa científica. A fabricação de novos materiais também reflete nas relações entre as suas propriedades, desempenho, comportamento e técnicas de materialização, sendo um conceito central na abordagem MFD.

Ainda há abordagens mais focadas no custo ou no desempenho da edificação, como a “*Lean Construction*” ou “Produção Enxuta” de Koskela (1998). Essa abordagem busca aumentar a eficiência e reduzir o desperdício no setor da construção. Tem como foco eliminar atividades que não agregam valor ao projeto e otimizar o fluxo de trabalho para aumentar a produtividade e reduzir custos. Assim, procura-se uma forma otimizar a construção, a fim de torná-los eficazes, econômicos e sustentáveis.

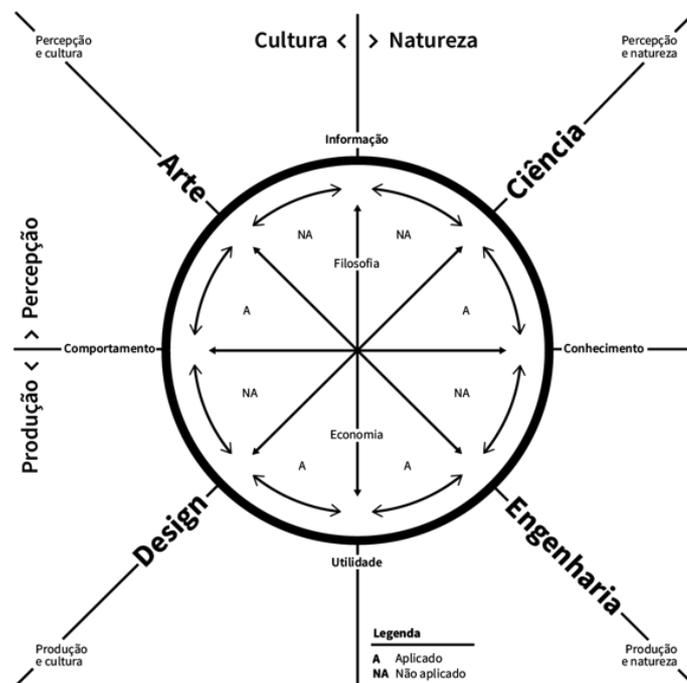
Similar a isso, há o projeto baseado no desempenho (ou PBD – “*Performance Based Design*”) que destaca o desempenho como o critério principal. Assim, se concentra em como os materiais, formas e processos podem ser projetados para melhorar o desempenho de um produto, estrutura ou ambiente. Para tal, baseiam-se em critérios específicos, como eficiência energética, resistência mecânica, conforto térmico, por exemplo; utilizando simulação computacional com auxílio de algoritmos e parâmetros para realizar modelos digitais. Nos quais, os projetistas podem explorar e otimizar diversas opções de projeto, levando em consideração as restrições e os requisitos de desempenho (OXMAN, 2008).

Ainda nesse sentido, Oxman (2016) formula o Ciclo da Criatividade de Krebs (*Krebs Cycle of Creativity* - KCC), fundamentada no Ciclo de Krebs¹. O KCC faz uma analogia a conversão de energia em diferentes formas de compreensão e comportamento: tem-se que a “Ciência” explica e prevê o conhecimento, a “Engenharia”

¹ O Ciclo de Krebs é responsável por produzir energia química nas células (ou Ciclo de Ácido Cítrico ou ciclo TCA). Esse ciclo é uma via metabólica no processo de respiração celular que gera energia na forma de ATP a partir da oxidação de acetil-CoA derivado de carboidratos, ácidos graxos e aminoácidos (OXMAN, 2016).

aplica o conhecimento para soluções práticas, o “Design” produz soluções para maximizar a função e a experiência humana, e a “Arte” questiona o comportamento humano. Por fim, no final do ciclo, a “Arte” inspira uma nova exploração científica. Contudo, o KCC descreve a perpetuação da energia criativa nas áreas da Ciência, Engenharia, Design e Arte por meio de quatro eixos distintos, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Ciclo de Criatividade de Krebs



Fonte: Adaptado de Oxman (2016)

O KCC combina ferramentas computacionais, biologia e ciência dos materiais (OXMAN, 2016). Além das aplicações realizadas por Oxman (2016), o KCC foi aplicado por Patel *et al.* (2021) em exploração com jogos.

Ao trazer o foco para o usuário, projeto ou gestão das etapas. Tem-se a abordagem centrada no usuário ou “*Human-Centered Design*”, que prioriza as necessidades e desejos dos usuários em todas as etapas do processo de projeto ou

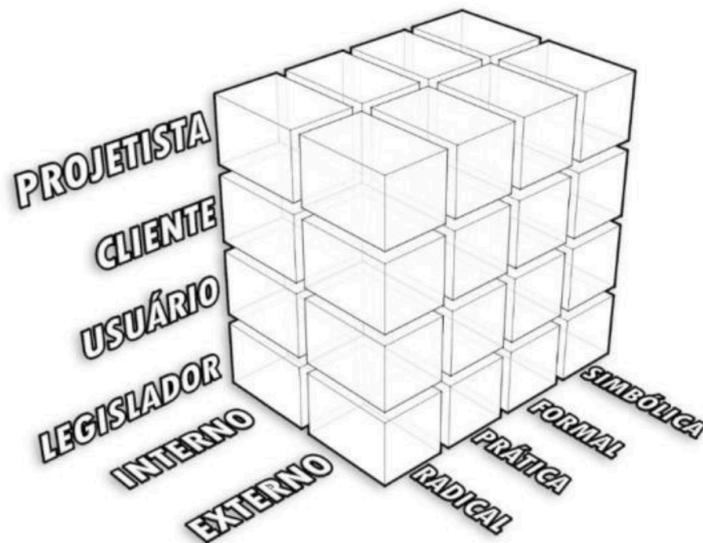
gestão. Ela visa criar soluções eficazes que atendam às necessidades do usuário, porém não tem a intenção de impor os resultados. Cooley (1987) objetiva preservar ou aprimorar as habilidades humanas através da colaboração com os usuários finais e outros especialistas. Busca-se focar na garantia de tecnologias que atendam às necessidades dos usuários e com caráter socialmente responsáveis. Aplicando o pensamento ao projeto, o “Metadesign” de Vassão (2010) visa aplicar o pensamento crítico ao processo de projeto em si, em vez de se concentrar apenas no objeto final. Essa abordagem enfatiza a importância da reflexão crítica e do engajamento com questões sociais, culturais e políticas em todos os estágios. Destaca-se a aplicabilidade em diversas necessidades e perspectivas, além do envolvimento de todas as partes interessadas. Essas atividades podem interferir no percurso do projeto em vários momentos dele.

Se o olhar se voltar para as etapas de projeto, Mozota (2003) destaca a importância de uma gestão eficaz do processo de projeto para garantir a qualidade e eficácia das soluções desenvolvidas, bem como para enfatizar a importância da inovação e competitividade. Esse processo auxilia nas perspectivas econômica e criativa, tornando-se essencial para o êxito do projeto.

Embora cada autor tenha uma perspectiva diferente sobre o processo de projeto, todos enfatizam a importância da experimentação e da flexibilidade no processo, assim como a colaboração com outras pessoas para criar soluções inovadoras e abordar desafios complexos. Além da reflexão sobre a prática e o aprimoramento do processo de projeto, é fundamental compreender como o ele se desenvolve a partir das materializações e das restrições envolvidas. Nesse sentido, Lawson (2011) destaca que as restrições podem ser definidas pelos diversos agentes envolvidos e ter diferentes naturezas, podendo ser internas ou externas. Essas restrições oferecem maior ou menor

liberdade ao projetista e podem dificultar ou permitir a alteração do projeto. Por isso, compreender a relação entre as restrições e o processo de materialização é fundamental para a criação de soluções inovadoras e eficazes (Figura 7).

Figura 7 – Tipos de restrições projetuais



Fonte: Adaptado de Lawson (2011)

Geralmente, o processo de concepção arquitetônica segue uma sequência que envolve a consideração de critérios como “forma, estrutura e material”. Nessa perspectiva, o arquiteto desenvolve primeiramente a forma, para posteriormente estruturá-la e materializá-la em colaboração com uma equipe multidisciplinar (OXMAN; OXMAN, 2010). Entretanto, é possível aprimorar essa abordagem ao considerar o projeto como um sistema complexo, composto por diversos elementos que interagem entre si, desde o contexto urbano e social até os materiais e tecnologias utilizados na construção.

Nesse sentido, a sistematização desse pensamento no processo projetual pode ser uma ferramenta para a concepção arquitetônica, permitindo uma abordagem mais integrada do projeto, que considera não apenas suas partes isoladas, mas também suas

relações e interdependências. Essa perspectiva pode levar a soluções mais eficazes e sustentáveis, que consideram não apenas as demandas estéticas e funcionais do projeto, mas também as questões sociais, econômicas e ambientais envolvidas na sua materialização.

2.2. Sistematizações para objetos arquitetônicos

Este tópico tem como objetivo discutir as diferentes sistematizações presentes na literatura para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos e sua relação com as etapas do processo projetual. Apresentam-se as taxonomias encontradas na literatura, que têm como foco o processo de projeto, a materialização, as etapas processuais e a geometria. A análise dessas taxonomias busca garantir que o resultado do processo de projeto atenda a critérios e restrições estabelecidos e auxilia no desenvolvimento de uma taxonomia para fabricação digital.

O pensamento sistêmico visa resolver problemas complexos, por meio da compreensão em uma estrutura, na qual os elementos se interconectam e possuem dependência entre si. Ao contrário do pensamento tradicional, que analisa as partes separadamente, o pensamento sistêmico sintetiza a partir do todo e ressalta as interações relevantes. Nesse processo, destaca-se o recorte que a estrutura vai abranger e como a colaboração e diálogo entre as partes interessadas auxiliam em soluções eficazes. A perspectiva sistêmica e os procedimentos sistemáticos são comuns no meio acadêmico. Elas consistem em uma sequência lógica de procedimentos metodológicos ou técnicas para alcançar um objetivo, independentemente do quadro conceitual adotado (ACKOFF, 1981).

No mesmo sentido, Checkland (1981) destaca que o pensamento sistemático consiste em uma sequência lógica de procedimentos metodológicos ou técnicas para alcançar um resultado ou objetivo. Então, o procedimento sistêmico conota uma forma organizada de pensar e proceder, na qual adota-se um objetivo norteador para resolver problemas complexos com diversas variáveis.

Uma forma de ordenar esse pensamento são as estruturas taxonômicas. Elas sistematizam os dados e estruturam informações considerando diferentes variáveis, a partir de agrupamentos prévios - a fim de atingir um objetivo (CAMPOS; GOMES, 2008; FRIEDMAN, 2003).

As taxonomias auxiliam diversas áreas, como ciências naturais, biológicas, humanidades, tanto nas artes criativas como nas aplicadas e na classificação de instrumentos para compreender a hierarquia na tecnologia (FRIEDMAN, 2003). Um exemplo disso é o artigo de Porter (2005) que aborda uma taxonomia para engenharia sísmica baseada em desempenho estrutural.

Neste tópico são exploradas as taxonomias presentes na literatura que foram classificadas em quatro temáticas: processo projetual, a materialização, as etapas processuais e a geometria. Discute-se as sistematizações consolidadas, a fim de entender o que está produzido para embasar a construção de uma nova taxonomia que auxiliem no processo projetual e na catalogação de projetos, a partir de técnicas e critérios que auxiliem na materialização arquitetônica pela fabricação digital.

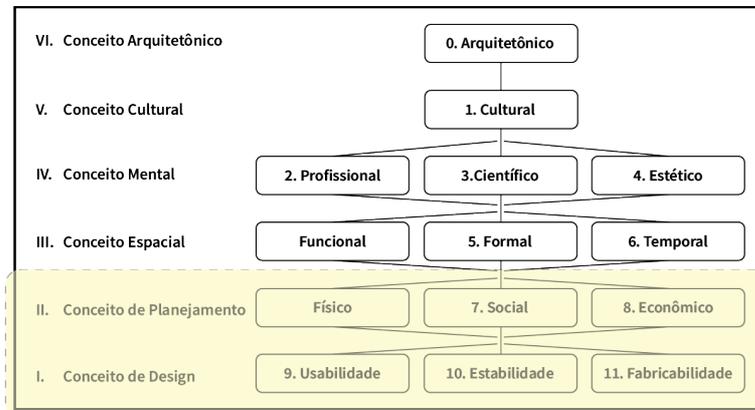
2.2.1. Taxonomias | Processo projetual

Este item aborda as taxonomias aplicáveis à arquitetura com foco no processo de projeto para fabricação digital. Apresentam-se estruturas diversas que incluem as taxonomias, abordando as etapas do processo projetual em sentido amplo e outras mais específicas. Estas se concentram em processos ou elementos focados, como o material ou a geometria do projeto de arquitetura. As taxonomias apresentadas embasam os critérios que compõem a Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura.

Uma das primeiras pesquisas que aborda as etapas da arquitetura e os elementos do projeto foi realizada por Bax e Trum (2000, 2002; 1996). Eles formularam a Teoria do Domínio, que relaciona o projeto arquitetônico com atividades de três dimensões: função, forma e procedimental. A dimensão funcional envolve conceitos sobre normas, no qual o edifício deve atender para atingir a qualidade de desempenho desejado. A dimensão formal inclui sistema de partes espaciais e materiais, ou ainda como parte de um sistema urbano com imagens do edifício – desenhos, esboços, diagramas. Por fim, a dimensão procedimental representa as operações de projeto e estratégias utilizadas durante o processo de projeto (TRUM; BAX, 1996).

Apesar do campo da arquitetura ser extenso e complexo, Bax e Trum (1996) sistematizaram doze conceitos divididos em seis níveis distintos para projetos arquitetônicos. Essa taxonomia permite a geração de soluções no contexto da arquitetura e a partir dos conceitos arquitetônicos de escala, planejamento e dimensões do espaço. As soluções resultantes podem ser aplicadas no processo de tomada de decisão, na concepção do projeto e no planejamento. Assim, na Teoria do Domínio, o projeto arquitetônico é resultado das três dimensões – funcionais, formal e temporal – que integram a taxonomia, conforme a Figura 8 (BAX; TRUM, 2000).

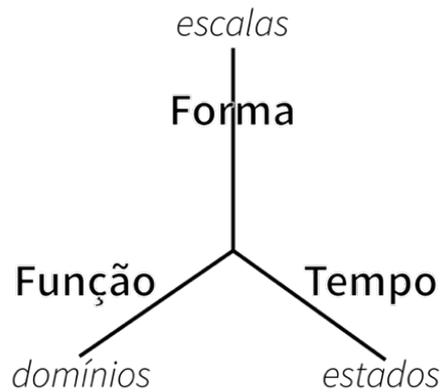
Figura 8 – Taxonomia de conceitos de arquitetura



Fonte: Adaptado de Bax e Trum (1996)

Seguindo o pensamento de Bax e Trum (2000), eles propuseram uma nova organização. Dessa vez, ela considera o projeto arquitetônico como parte do processo construtivo, adicionando-se às fases de uso, gerenciamento, adaptação e demolição. Essa proposta ainda se baseia na "Teoria do Domínio", mas auxilia no desenvolvimento de edifícios considerando sistemas, subsistemas e elementos. O modelo proposto, denomina-se: “Modelo GOM” e utiliza as dimensões nos eixos X, Y e Z. Esses eixos articulam as dimensões formais, funcionais e temporais do objeto. De acordo com essa taxonomia, um objeto é sempre definido por essas dimensões independentemente do estágio de desenvolvimento (Figura 9).

Figura 9 – Modelo GOM



Fonte: Adaptado de Bax e Trum (2000)

Ainda nesse sentido, o Modelo GOM aborda que a dimensão formal deve observar aspectos morfológicos ou seja, a partir de elementos espaciais e em consonância com as regras de composição. A dimensão funcional, por sua vez, relaciona aspectos que abordam as regras e normas ou programa de requisitos. Por último, a dimensão temporal ressalta as variantes referentes a organização das atividades através do tempo. Todas as dimensões buscam a autonomia e são aplicáveis em todos os níveis do processo de projeto. O modelo é composto por fases de identificação, definição e especificação, nas quais ocorrem processos parciais e *feedback* simultaneamente (BAX; TRUM, 2000).

Na pesquisa seguinte, Bax e Trum (2002) relacionam os domínios da taxonomia com os conceitos e categorias necessários para um projeto arquitetônico. Desse modo, a taxonomia é uma aplicação da teoria do domínio. Essa matriz tem a primeira linha que indica o “Domínio arquitetônico”; a segunda demonstra a subdivisão em um “Formulário”, um “Processo” e um “Domínio de Função”, e na terceira linha há a subdivisão dos domínios relacionados ao desempenho do material (1), performance no desempenho ambiental (2) e cultural (3), conforme a Figura 10.

Figura 10 – Domínio de arquitetura

Domínio Arquitetônico				
Domínio da forma	Domínio do processo	Domínio da função		
(Níveis)	(Fases)	1. Performance do material	2. Performance ambiental	3. Performance cultural
Urbano Construção Elemento	Análise Síntese Avaliação	1.1. Estabilidade 1.2. Maleabilidade 1.3. Usabilidade	2.1. Físico 2.2. Econômico 2.3. Sociológico	3.1. Estético 3.2. Científico 3.3. Profissional

Fonte: Bax e Trum (2002)

No passo seguinte, os autores propuseram uma estrutura matricial para representar de forma clara o processo decisório do projetista, considerando os conceitos formais, funcionais e temporais na matriz de nove por três níveis. Adicionaram três conceitos universais, denominados Potencial, Atual e Intencional, e estabeleceram a relação entre as dimensões Forma, Processo e Função nas interações das partes em processos interdisciplinares. A matriz bidimensional resultante, que reformula a taxonomia de domínios, é codificada de 1,1 a 3,3, considerando as categorias potencial, atual e intencional para as colunas e os índices das linhas são definidos pelos conceitos materiais, ambientais e culturais. A matriz permite a definição de índices para os campos de cada conceito, proporcionando uma clareza na compreensão das relações entre os elementos, bem como das dimensões formais, funcionais e temporais envolvidas no processo de projeto de arquitetura (Figura 11) (BAX; TRUM, 2002).

Figura 11 – Matrix de conceitos 3x3

Conceitos	Potencial (1)	Atual(2)	Intencional (3)
Material (1)	Estabilidade (1.1)	Fabricabilidade (1.2)	Usabilidade (1.3)
Ambiental (2)	Físico (2.1)	Econômico (2.2)	Sociológico (2.3)
Cultural (3)	Estético (3.1)	Científico (3.2)	Profissional (3.3)

Fonte: Adaptado de Bax e Trum (2002)

Essas taxonomias têm em comum a aplicabilidade nas fases de concepção arquitetônica. Há a progressão dos conceitos propostos, a reorganização em níveis e temas. Esses critérios podem ser aplicados no desempenho do material, no impacto ambiental ou ainda no desenvolvimento do elemento. Nesse processo, houve a adição da variável tempo para quantificar a realização de determinada tarefa, o que auxilia no entendimento das variáveis de custo e tempo.

O tempo é um assunto destacado por Sass e Oxman (2006), no qual eles quantificam o tempo gasto para construir o projeto da *Instant House*. Essa variável é influenciada pelo número de componentes utilizados para uma certa quantidade de material e custo; pelos encaixes; pelo número de dias necessários para a montagem e o corte das peças; e pelos componentes necessários para a fabricação (Tabela 1).

Tabela 1 – Ficha técnica da *Instant house*

Medidas do modelo de controle			
1	Material da edificação	0.75" (.076 metros)	Compensado CDX
2	Compensado Naval	12-15gal (45-56 litros)	Tipo: <i>Thompson's Water seal</i>
3	Número de componentes	984	Partes
4	Dias de corte	55.4	Horas ou 2 dias e 7.4 Hrs
5	Dias de montagem	35.43	horas
6	Custo	114	placas x \$22/placas =\$2,508 US

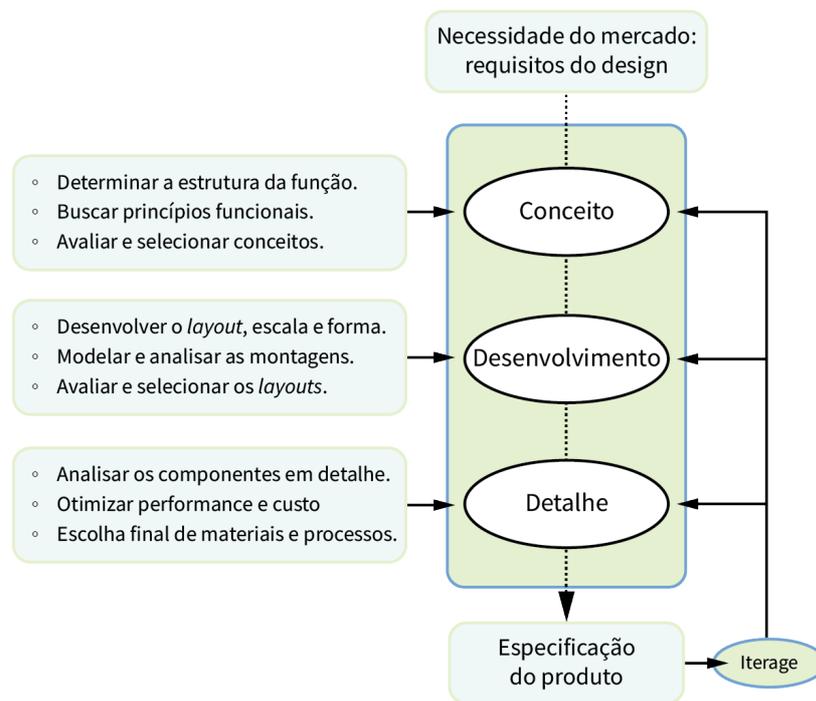
Fonte: Sass e Botha (2006)

As variáveis de tempo, montagem e material também é um assunto estudado por Michael Ashby (2005-, 2010, 2013; 2019; 2012) que se dedica a compreender os diversos fatores que implicam no desenvolvimento de projeto. Segundo ele, inicia-se uma nova taxonomia a partir de uma ideia inovadora ou necessidade, passando pelo desenvolvimento e detalhamento completo até solucionar a problema inicial. A pesquisa do autor se concentra em caracterizar a eficiência dos materiais e sua relação no desenvolvimento de objetos.

Ashby (2013) ainda destaca como devem ser as fases para o desdobramento do projeto. Desse modo, ele elabora três etapas sequenciais: conceito, desenvolvimento e incorporação que são progressivamente aplicadas ao objeto. Na primeira fase, o projetista considera conceitos e formas, em seguida avalia quais variáveis deverão ser escolhidas ou combinadas. Na fase seguinte há o desenvolvimento dos critérios que envolvem a escala, forma e layout, na qual é analisado o funcionamento do modelo a partir da montagem e encaixes. Busca-se o dimensionamento dos componentes com base na seleção dos materiais compatíveis com os requisitos ambientais. A partir dessa escolha, intenciona-se analisar o desempenho e o custo que irá impactar no modelo. Por fim, na “fase de incorporação” elabora-se um *layout* viável que será executado na fase

de detalhamento do desenho e com as especificações. Também nesta fase, escolhe-se a forma final da geometria, dos materiais e métodos de produção com o custo, a fim de alcançar o resultado mais detalhado (Figura 12).

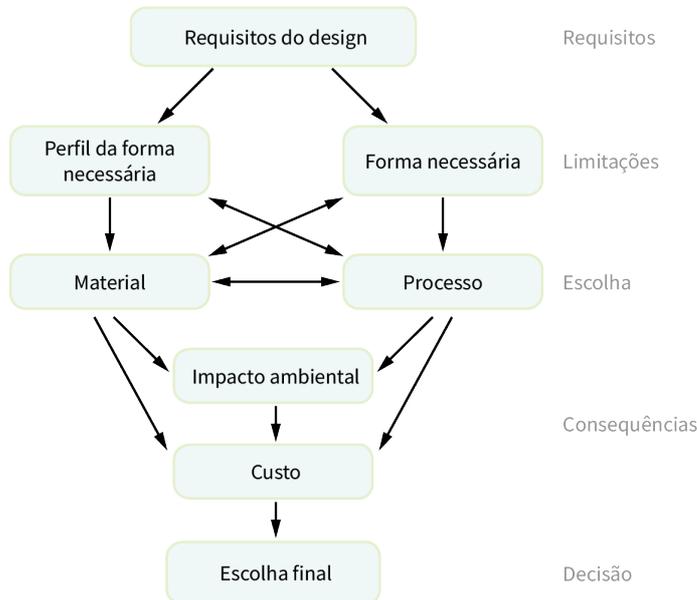
Figura 12 – Etapas do processo de projeto



Fonte: Adaptado de Ashby (2013)

Ashby (2019) explica como direcionar a fabricação de um objeto a partir de critérios selecionados no início do projeto. À medida que a complexidade da forma do objeto aumenta, as especificações e interações se tornam mais rigorosas. A escolha dos requisitos para o projeto é o ponto de partida, seguido pelas restrições de forma que devem ser incorporadas ao objeto. Em seguida, ocorre a seleção do material e do processo, para o qual o autor elaborou um catálogo dos processos mais comuns, categorizando as propriedades mecânicas e físicas dos materiais. Finalmente, o impacto ambiental e o custo são avaliados para definir a solução final, conforme a Figura 13.

Figura 13 – Interação entre os requisitos

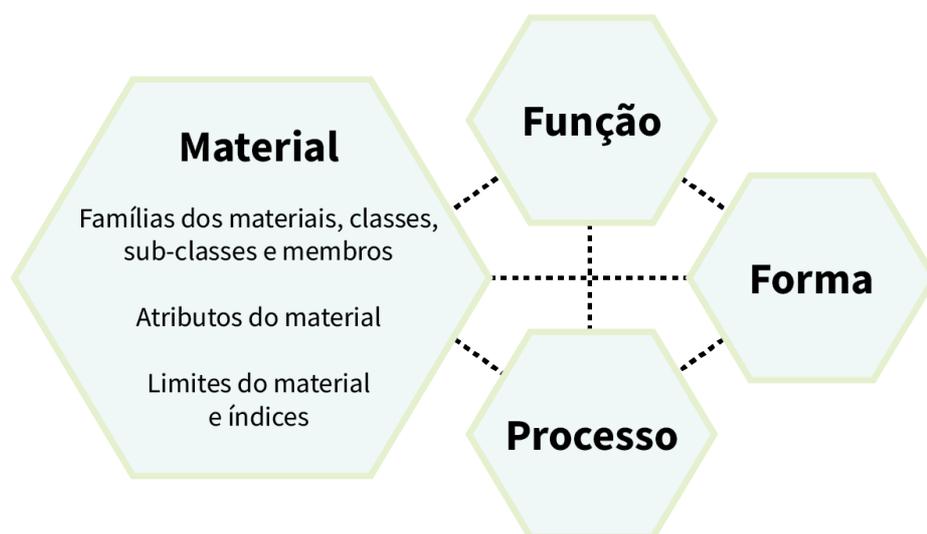


Fonte: Adaptado de Ashby (2019)

Desse modo, se o processo de fabricação for o ponto central do projeto, o autor afirma que é necessário programar ou ainda comparar os custos aproximados entre projetos semelhantes para assim tomar uma decisão.

No intuito de definir um norte para o desenvolvimento do projeto existem taxonomias que são centradas em determinadas áreas do objeto. Por exemplo, Agudelo *et al.* (2017) considera a relação entre os critérios de materiais, função, processo e forma importantes para o desdobramento do objeto (Figura 14). A taxonomia proposta é centrada na escolha dos materiais, nos estágios iniciais do processo de projeto, e se apoia em decisões relativas à forma e os processos de fabricação.

Figura 14 – Procedimento para escolha do material



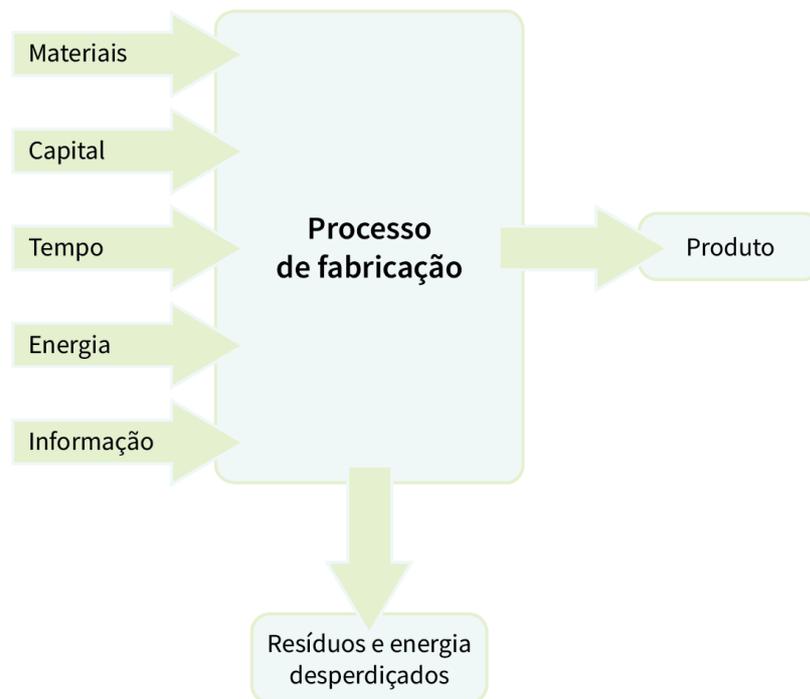
Fonte: Adaptado de Agudelo *et al.* (2017)

A seleção de materiais não é simples, envolve questões relativas ao preço, resistência do material, temperatura, estabilidade, densidade e dureza. Adicionalmente aos fatores: contexto local, moda e cultura. Por isso, a seleção é um processo iterativo que envolve otimização subsequente. Uma mudança no projeto ou a troca de um material pode torná-lo aceitável e resultar em um preço mais baixo do produto. Essas modificações no material influenciam no projeto, na forma e/ou na fabricação (AGUDELO; PAILHES; MEJÍA-GUTIÉRREZ, 2017).

A taxonomia proposta pode ser utilizada para avaliar o impacto ambiental durante o processo de fabricação. Na fase de programação arquitetônica, as ferramentas utilizadas para escolher materiais, forma e processos de fabricação também permitem mensurar a viabilidade dos processos de fabricação e a eficiência energética dos materiais. Destaca-se que mudanças nos materiais utilizados em um elemento podem modificar o projeto e até mesmo influenciar na forma, características e métodos de fabricação (AGUDELO; PAILHES; MEJÍA-GUTIÉRREZ, 2017).

Ainda no processo de materialização arquitetônica, ressalta-se componentes que possuem um custo associado. Dessa forma, o custo final é composto pela soma de todos os outros envolvidos na fabricação de um objeto. Essa variável consta no diagrama formulado por Ashby (2019), no qual considera na entrada do processo de fabricação as variáveis: materiais, custo, tempo, energia e informação com um desperdício de resíduos e energia para fabricação do objeto (Figura 15).

Figura 15 – Parâmetros de entrada



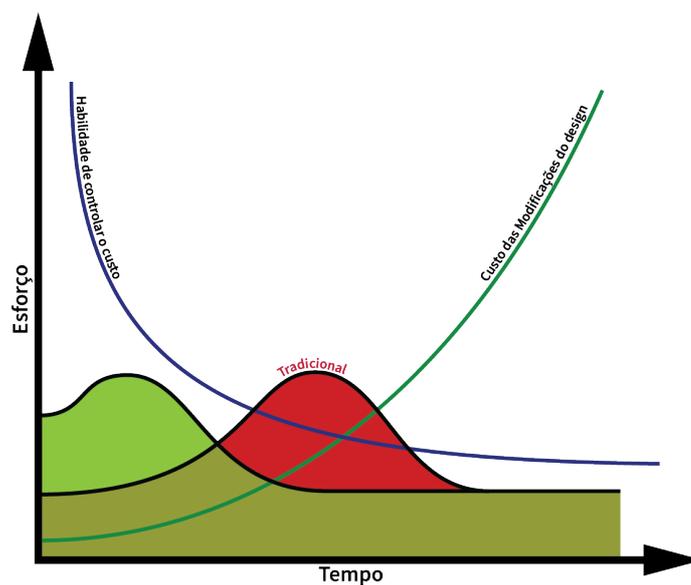
Fonte: Adaptado de Ashby (2019)

No processo de fabricação, o custo de produção de um componente depende dos valores de seus insumos, como: materiais, custo da ferramenta e do equipamento em si. Além disso, para viabilizar a produção de um objeto requer tempo, sendo assim uma variável indireta; que inclui o custo de mão de obra, administração e custos gerais da indústria. Agregado a esse processo, tem-se a energia que influencia na etapa do

processo de fabricação, o custo das informações que relacionam a pesquisa e desenvolvimento, royalties ou de licença. Sendo, por fim, o custo final a soma de todos os valores envolvidos no processo de fabricação desse objeto (ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2019).

Para explicar como esse custo cresce, o arquiteto Patrick MacLeamy (2004) desenvolveu uma curva em forma de gráfico para auxiliar equipes de gerenciamento de projetos a equilibrar o custo e a qualidade do projeto. Composta por duas curvas em forma de U invertido: a curva de custo e qualidade mostra que à medida que o projeto avança, o custo aumenta e a qualidade pode melhorar ou diminuir. O ponto onde as duas curvas se intersectam representa o equilíbrio, onde a qualidade do projeto é a melhor possível para o custo investido (Figura 16).

Figura 16 – Curva de MacLeamy



Fonte: Adaptado de CURT (2004)

A Curva de MacLeamy auxilia e serve de alicerce a diversos estudos no campo da materialização arquitetônica, no qual o autor propõe que o controle nos custos do

projeto diminui à medida que as etapas avançam. Ao mesmo tempo que os custos com as alterações de projeto aumentam. O critério de custo está sempre presente nas discussões sobre materialização arquitetônica, podendo ser um impeditivo ou um guia para o desenvolvimento dos objetos.

As taxonomias apresentadas abordam critérios e etapas necessárias para desenvolver o processo de projeto, bem como as variáveis que utilizam parametrização. Ressalta-se que cada tipo de classificação pode ser mais adequado para um determinado projeto ou área de estudo, dependendo dos objetivos e características específicas envolvidas. Isso porque existem estruturas taxonômicas que se dedicam a temas específicos, o que pode influenciar nos critérios estudados.

2.2.2. Taxonomias | Materialização arquitetônica

Discutem-se aqui as estruturas taxonômicas que enfocam no processo de materialização arquitetônica para objetos. Tais estruturas compreendem diversas etapas do processo de projeto, tais como a seleção de materiais para cada aplicação e o uso de maquinários específicos. Diversos autores propõem critérios para a composição dessas taxonomias, cada qual com suas particularidades, como aquelas que focam em processos específicos de fabricação, classificação das peças de acordo com o material utilizado, a orientação do objeto ainda como o processo de fabricação será aplicado.

Nesse sentido, o trabalho de Ashby (2019) se destaca ao formular o “Triângulo do método da manufatura”. Essa taxonomia considera fatores econômicos, técnicos e de qualidade envolvidos no processo de fabricação (Figura 17). A estrutura apresenta círculos temáticos e coloridos ao centro, enquanto distribui círculos menores na periferia da figura. Remete assim aos subtemas abordados, no qual auxilia no entendimento do

modo sistêmico e integrado ao processo de fabricação. Dessa forma, é possível perceber a relação entre a seleção de materiais, técnicas de fabricação e controle de qualidade, o que contribui para a eficiência e sustentabilidade (ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2019).

Figura 17 – Triângulo da manufatura



Fonte: Adaptado de Ashby (2019)

Em “soluções de engenharia” destaca-se a importância da eficiência do material como centro das decisões. Nessa taxonomia, sintetiza-se as variáveis que se aplicam no processo de projeto, incluindo o desempenho ambiental que impacta na vida útil do modelo produzido. Isso afeta no aprimoramento e eficiência dos materiais, ao utilizar equipamentos que possibilitam a reutilização de materiais e adaptação dos produtos e serviços à disponibilidade local. Há também explorações de soluções para melhorar a forma do objeto por meio do material e da tecnologia aplicada, considerando as leis que influenciam na forma e na responsabilidade social, bem como a adaptação do projeto no contexto social (ASHBY, 2013), conforme a Figura 18.

Figura 18 – Soluções de engenharia



Fonte: Adaptado de Ashby (2013)

Os temas abordados por Ashby (2013) são relevantes para o processo de projeto e quanto mais cedo decididos, maior o impacto no projeto. No entanto, há informações que são difíceis de acessar nesse processo, tais quais: quais a legislação, o contexto político social no qual o objeto será implantado; algumas propriedades do material; e instrumentos econômicos. Nesses casos, é necessária a colaboração de uma equipe multidisciplinar para obter as respostas.

Além das contribuições de Ashby nas taxonomias que abordam o projeto, ele se dedicou na catalogação dos materiais utilizados na arquitetura e engenharia. Um exemplo disso é a "árvore dos materiais", que distribui os elementos em seis categorias com seus respectivos materiais para facilitar a indicação e discussão na obra (Figura 19).

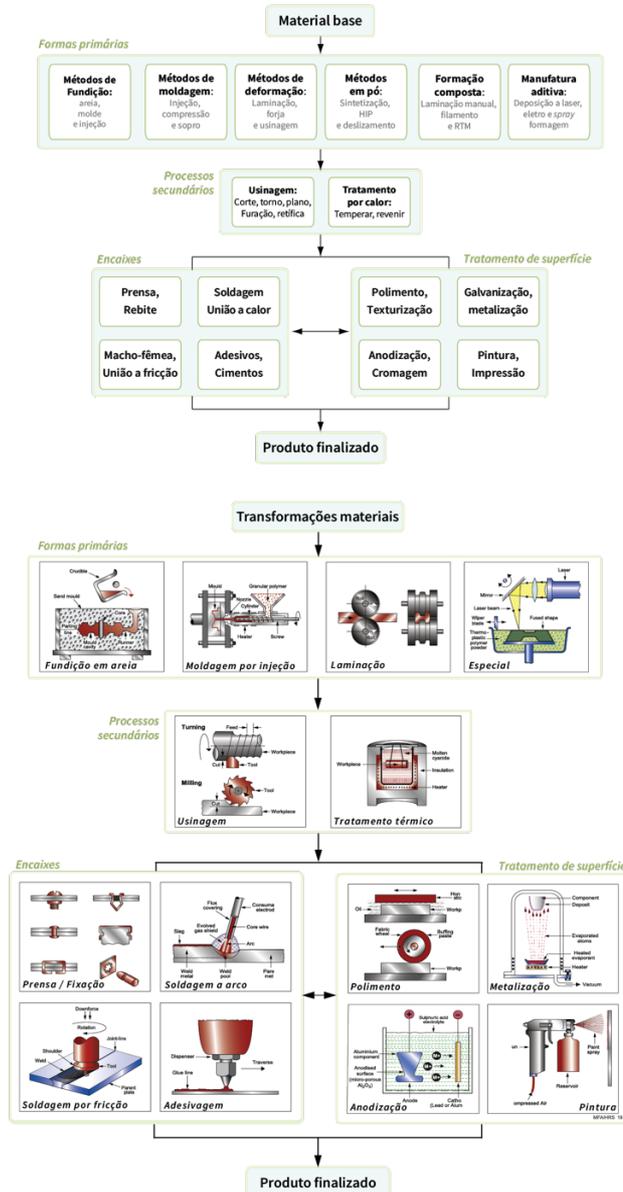
Figura 19 – Árvore de materiais



Fonte: Adaptada de Ashby (2019)

Nesse estudo há um avanço na relação entre os materiais apresentados e os processos de fabricação. Ashby (2019) classifica os materiais de acordo com as suas categorias e relaciona com a capacidade do material de se moldar, unir ou servir como parte de um acabamento. Essa taxonomia caracteriza o processo que o material será submetido no estágio inicial do projeto, antes que haja modificações substanciais e o custo para fazer alterações se torne um proibitivo. Assim, a geometria de um objeto depende do material do qual ele será feito; da sua forma, dimensões e precisão; bem como a quantidade para produção e se atende os requisitos de projeto (Figura 20).

Figura 20 – Família e classes de processos de fabricação



Fonte: Adaptado de Ashby (2019)

Ainda no contexto das taxonomias para a materialização arquitetônica a partir de processos específicos, destaca-se as etapas encontradas por Cooper (2001) para a prototipagem rápida (PR). O autor divide o processo de projeto em cinco etapas entre a produção e a verificação dos erros de projeto, tais quais “Conceito”, “Projeto

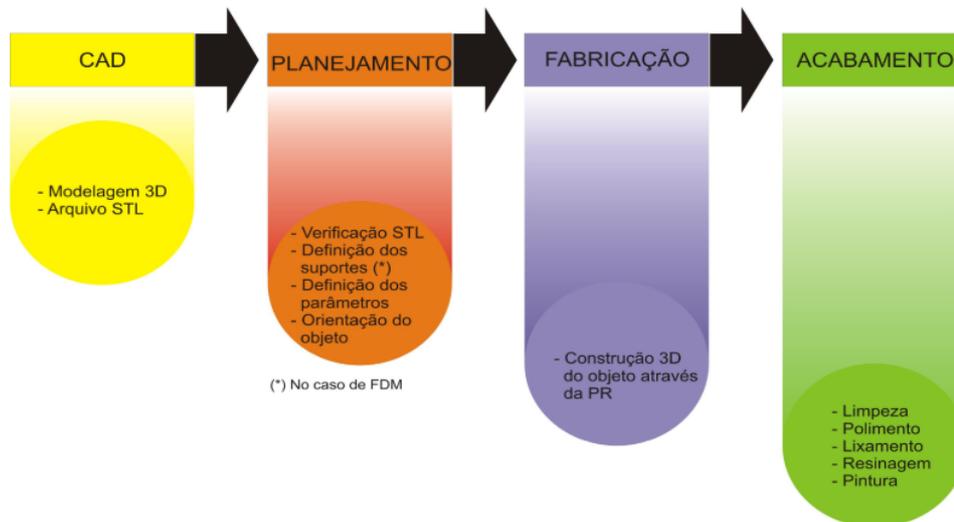
Preliminar”, “Fabricação Preliminar de Protótipo”, “Produção de curto prazo” e “Produção final”:

- I. **Conceito** – Um novo produto, melhoria de um antigo produto, deve começar como um conceito ou ideia. Essa ideia pode ser baseada em uma necessidade ou um desejo. No entanto, para se tornar realidade, o conceito deve ser realizado através do processo de design para fabricação.
- II. **Projeto Preliminar** – Pode ser um esboço simples com um desenho bidimensional ou mesmo a um modelo sólido CAD da peça que precisa ser construída. O desenho pode passar por muita iteração durante essa fase, pois o projetista determina a viabilidade do produto. A prototipagem rápida (RP) pode permitir que o projetista tenha uma representação física para ajudar a demonstrar o uso e as funções do produto.
- III. **Fabricação Preliminar de Protótipo.** A pré-aprovação do projeto deve ser mediante a fabricação do protótipo. Antes da PR, essa fase da fabricação era realizada manualmente ou usinada, o que pode ser demorado e caro. Modelos de plástico ou similares podem ser fabricados para análise e ajustes, assim determinar o tamanho correto, forma e outros detalhes. Esta etapa pode se repetir várias vezes até que o projeto adequado é adquirido.
- IV. **Produção de curto prazo.** Às vezes, uma sequência de produção de curto prazo pode ser necessária para uma prova adicional de uma peça antes de entrar na produção final. Nessa fase, quaisquer erros ou falhas no projeto devem ser encontradas durante ou antes deste estágio, caso contrário, poderá se tornar muito caro.
- V. **Produção final.** Nesta etapa final do processo, as peças normalmente são usinadas, moldadas por injeção ou fundidas em vários protótipos. Os padrões para injeções, ou ferramentas, geralmente são usinados em alumínio ou aço, para que possam ser usados milhares, até centenas de milhares de vezes. O desenvolvimento de processos diretos de metal e cerâmica, a RP ainda pode alcançar essa fase breve (COOPER, 2001, p. 3).

Essas etapas enumeradas por Cooper (2001), possivelmente embasam e auxiliam no desenvolvimento da proposta formulada por Pupo e Celani (2009) anos mais tarde. As autoras sintetizam os passos para fabricação digital em quatro etapas: CAD, planejamento, fabricação e acabamento. Na primeira etapa ocorre a modelagem no *software* CAD; em seguida, a verificação do modelo e o formato de leitura da máquina, além da definição de suportes e parâmetros, se for utilizar a máquina de produção com

FDM; posteriormente tem-se a orientação do projeto. A terceira consiste na construção do objeto propriamente dito, e, por fim, a última etapa aborda o acabamento, que envolve a limpeza, polimento, lixamento, resinagem e pintura (Figura 21).

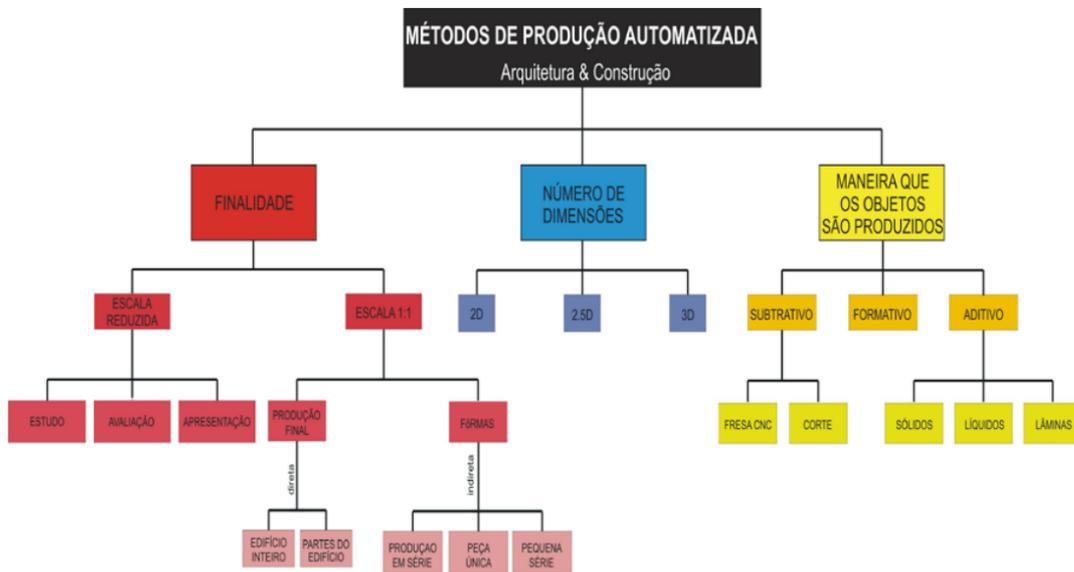
Figura 21 – Etapas do processo de prototipagem rápida



Fonte: Pupo e Celani (2009)

Essas taxonomias apresentam as etapas para a fabricação do objeto, permitindo que se compreenda melhor o que acontece em cada uma delas e como ocorre o processo de projeto. Assim, no intuito de focar na produção automatizada, Pupo (2008) categoriza algumas técnicas e processos de fabricação para serem aplicáveis na arquitetura e construção. A Figura 22 ilustra os métodos de produção automatizada em um modo hierárquico, de acordo com a finalidade do produto (escala reduzida e escala 1:1), o número de dimensões (2D, 2,5D e 3D) e a maneira que os objetos são produzidos (subtrativo, formativo e aditivo).

Figura 22 – Métodos de produção automatizada



Fonte: Pupo (2008)

A discussão da escala do objeto é um critério que permeia por quase todas as taxonomias. Embora seja uma questão aparentemente óbvia, uma vez que todos os objetos pertencem a alguma escala, muitos projetistas não levam em conta a importância de entender o tamanho do objeto antes de iniciar a fabricação. A escala do objeto impacta em diversos aspectos, desde o número de peças, as dimensões até a compatibilidade com a máquina no qual será produzido. Afeta também o custo da produção e a cadeia de materialização, já que objetos maiores geralmente requerem mais materiais, tempo e energia para serem produzidos. Sendo assim, essencial que os projetistas levem em conta a escala do objeto, desde o início do processo de fabricação para garantir que ele possa ser produzido de maneira eficaz e sem comprometer a qualidade final do produto.

A escolha da “Escala” na fabricação digital pode influenciar em diversas formas o objeto projetado. Primeiramente, o maquinário para fabricação digital é projetado para

lidar com tamanhos específicos, e a escala (pequena, média, grande ou extragrande) pode influenciar na adequação do equipamento utilizado. Além disso, à medida que a escala de um projeto aumenta, a precisão, uniões e resíduos são mais desafiadores. A escala também afeta na adequação e no desempenho dos materiais utilizados, sendo por vezes necessária a utilização de simulações computacionais. O aumento do tamanho de um objeto, também pode influenciar no tempo de fabricação, o que impacta relação custo-benefício do projeto. O custo da fabricação digital pode alterar à medida que a escala de um projeto aumenta devido à necessidade de equipamentos maiores, mais materiais e maior tempo de produção. Além disso, o transporte de produtos fabricados em larga escala pode ser mais desafiador e caro, pois exigem equipamentos e técnicas especializadas para movimentação e manuseio. A escala também tem um papel importante na estabilidade da peça, materiais, tempo de produção, custo e transporte ao projetar e produzir objetos a partir da fabricação digital (NICHOLAS *et al.*, 2016).

A escala das peças também é um tema explorado por Sass (2010) no contexto da fabricação digital. O autor enfatiza que a escala do objeto pode ser limitada pelas restrições impostas pela máquina, incluindo as ferramentas CAD/CAM, as máquinas e os materiais de modelagem disponíveis. Dessa forma, a escolha da escala pode influenciar nas ferramentas e nos processos de fabricação, bem como no custo e na eficácia do processo. A consideração da escala também é importante para a garantia da precisão e qualidade da peça final, especialmente em relação à adequação das dimensões do objeto às capacidades da máquina e dos materiais utilizados.

2.2.3. Taxonomias | Etapas processuais

Este item discute as estruturas taxonômicas relacionadas ao maquinário para fabricação digital que podem ser utilizadas em processos aditivos ou subtrativos. Nesse contexto, aborda-se o maquinário adequado para o processo de materialização arquitetônica e quais são os critérios necessários para utilizá-los na taxonomia. Esses critérios se somam aos encontrados nos outros tópicos e auxiliam no embasamento da Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura.

A arquitetura está em processo de transformação, que envolve tecnologias computacionais, materiais e habilidades práticas. Essa transformação envolve a disponibilidade de processos, nos quais os projetistas estão cada vez mais envolvidos no processo de fabricação dos projetos arquitetônicos. Uma vez que os métodos convencionais de construção estão passando por mudanças significativas no seu modo de materialização arquitetônica (KOLAREVIC, 2003; STACEY; BEESLEY; HUI, 2005).

A prototipagem rápida (PR) é um dos métodos que utilizam tecnologias digitais para apoiar o processo criativo, produzindo variações de elementos ou conjuntos de objetos. A PR auxilia no estudo da forma, do espaço, da estrutura e dos materiais na construção; reduzindo o tempo de execução e simulação - em relação às técnicas convencionais de modelagem e fabricação. Para trabalhar com um material específico usando máquinas de PR, é preciso ter habilidades de projeto para modelar as geometrias de acordo com as regras do material. Então, para usar madeira compensada é necessário entender os limites da folha plana do compensado. As geometrias são criadas no computador e convertidas em um modelo para ser cortado a laser ou CNC. Se métodos generativos forem utilizados, as regras para madeira compensada são baseadas em regras para a manipulação de materiais planos. O uso de papel cartão para corte à laser

segue as mesmas regras que o corte de madeira compensada, pois ambos são materiais planos (SASS; OXMAN, 2006).

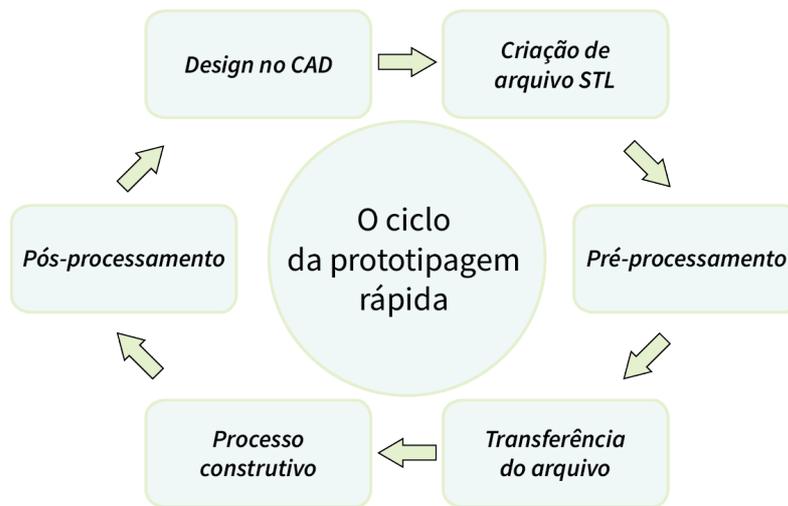
Os processos utilizados na fabricação digital incluem técnicas aditivas e subtrativas que vão desde o corte à laser até a impressão física tridimensional, processos utilizando robôs e o roteamento com máquinas fresadoras de cinco eixos. Para processos subtrativos são utilizados equipamentos como máquinas de corte à laser, corte à plasma e fresadoras com corte CNC. Nos processos aditivos, as impressoras 3D e robôs automatizados adicionam camadas para criar componentes com uma aparência escultural. No mercado, existem diferentes modelos e tamanhos de equipamentos disponíveis para atender às necessidades de produção de protótipos em várias escalas. Os protótipos podem ser usados para testar a funcionalidade do projeto, o conforto ambiental e ergonômico, utilizando materiais semelhantes ou do elemento projetado (PUPO; CELANI, 2009).

É possível utilizar os processos subtrativos e aditivos ao mesmo tempo para fabricar um objeto. Um exemplo é o uso de uma fresadora CNC para cortar uma peça bruta (processo subtrativo) e, em seguida, a adição de camadas de material por meio de impressão 3D (processo aditivo). Para este processo denomina-se “processos híbridos”, eles podem ser “sequenciais” como o exemplo citado, ou podem ser feitos por apenas uma máquina (MANOGHARAN *et al.*, 2015).

Jacobs (1992) estabelece o “Ciclo da prototipagem rápida” que liga o desenho e a fabricação. O autor recomenda começar com a criação da geometria no CAD, seguido pela construção do protótipo usando PR, para depois ser feita a verificação e correção de erros no CAD. Depois disso, os modelos fabricados são comparados e otimizados, assim podem ser testados antes de prosseguir com a produção real. Cooper (2001) propõe um ciclo semelhante, adicionando etapas que refinam o desenho fabricado.

Desse modo, o autor adiciona as etapas de “pré-processamento” do arquivo, “transferências de arquivos”, “construção do projeto” e “pós processo” no ciclo de prototipagem rápida, ilustrado Figura 23.

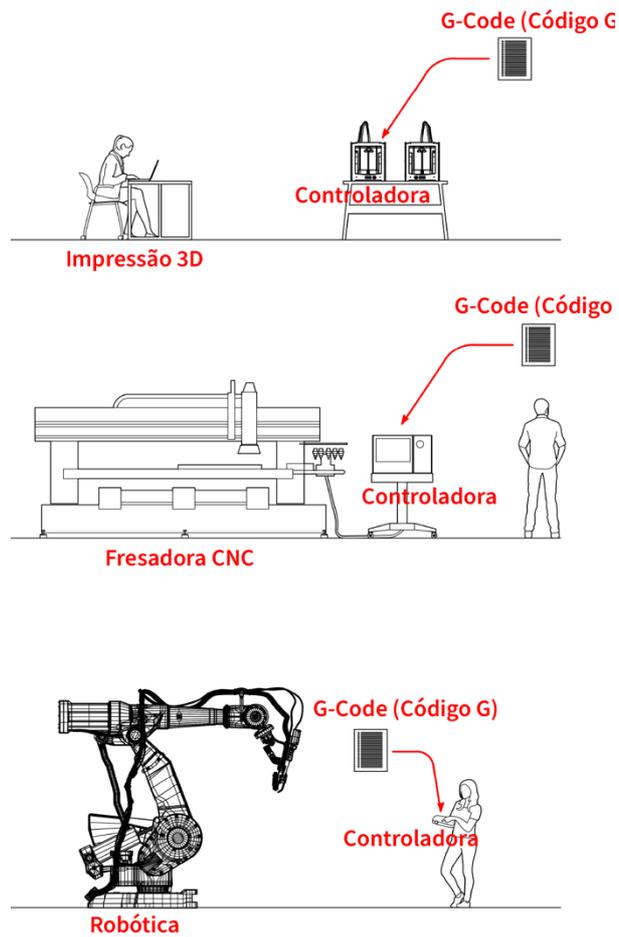
Figura 23 – Ciclo da prototipagem rápida



Fonte: Adaptado de Cooper (2001)

Sass (2022) também ilustra esse processo de fabricação dos elementos, no qual é utilizado até hoje. Nesse processo, os desenhos são transformados em um código (G-Code) capaz de ser encaminhado para o controlador da máquina (“*Controller*”) e fabricado. Esse controlador traduz o desenho para máquina e assim é possível construir as peças em poucas horas, de modo autônomo e por vários dias. Após a conclusão do processo há a remoção da peça da máquina e dos suportes, e procede-se com o lixamento ou acabamento. Se a peça acabada atender aos requisitos necessários, o ciclo estará completo. Caso contrário, as retificações podem ser implementadas no modelo CAD e o ciclo é repetido (Figura 24).

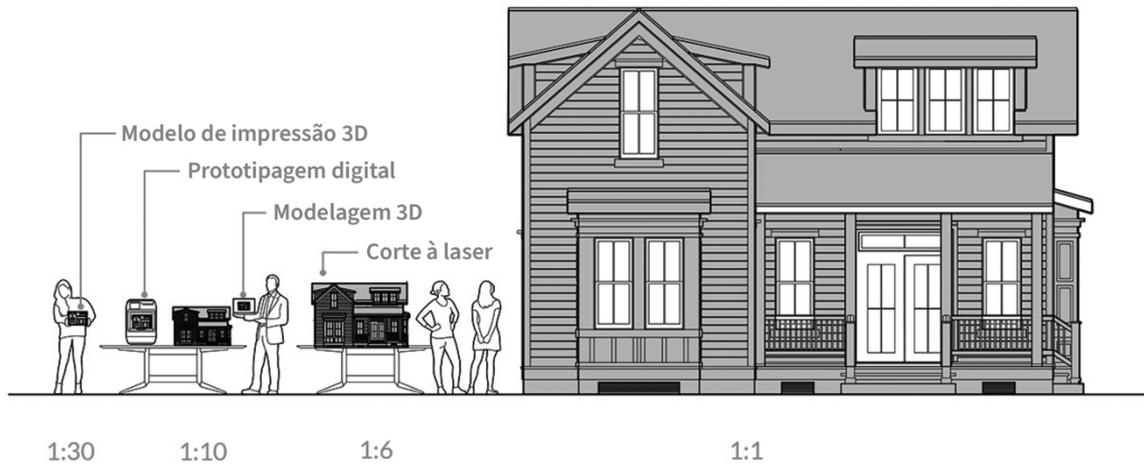
Figura 24 – Máquina e o G-Code



Fonte: Adaptado de Sass (2022)

Esse processo de prototipagem também pode ser usado para produzir peças grandes, permitindo a fabricação digital de uma casa em tamanho real. Esse método pode incluir tanto processos aditivos quanto subtrativos para a criação de protótipos. Primeiro, o desenho é produzido e, em seguida, um protótipo em 3D é fabricado com uma impressora. Depois, um modelo em escala reduzida é produzido com uma máquina de corte a laser (SASS, 2022). Por fim, as peças são fabricadas em tamanho real usando uma fresadora CNC, como ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Interação entre o processo



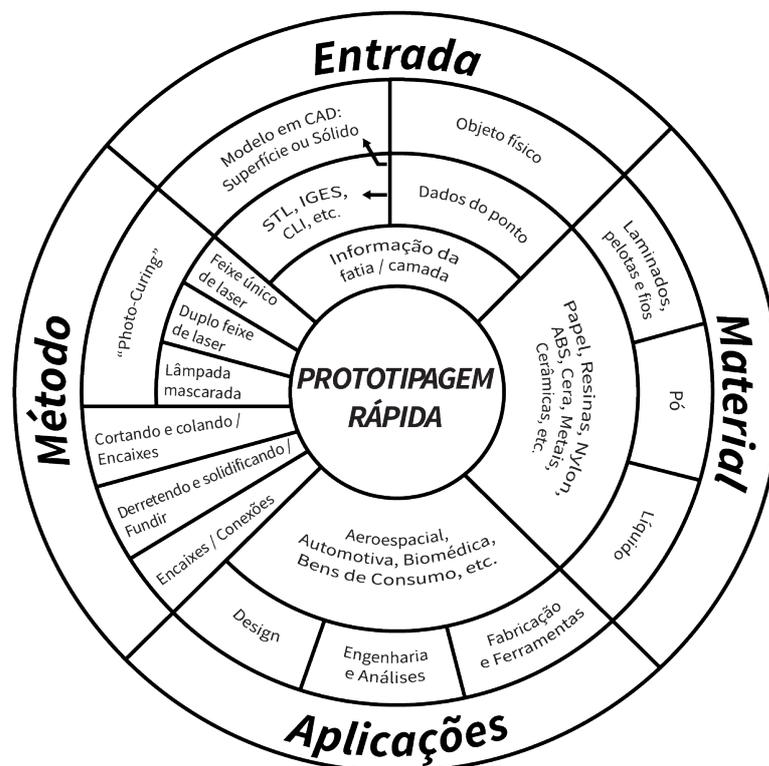
Fonte: Adaptado de Sass (2022)

Na fabricação digital, um dos desafios é selecionar o maquinário adequado. Com tantas opções disponíveis no mercado, escolher a máquina certa pode ser um processo complexo. É essencial conhecer minuciosamente as capacidades, limitações e possibilidades de cada aplicação específica. Embora as etapas do processo sejam constantes, as variações ocorrem nos materiais utilizados, nos tempos de impressão e acabamento e no procedimento de finalização. O ponto de partida é a criação de um modelo digital 3D, que pode ser gerado em qualquer sistema CAD ou obtido por meio de digitalização tridimensional do objeto a ser prototipado (PUPO; CELANI, 2009). Além disso, Stacey *et al.* (2005) apontam que, dentro de cada processo de fabricação, há um delta de possibilidades, e muitas das questões fundamentais sobre a forma, a junção de materiais e componentes permanecem inalteradas pelo uso da fabricação digital.

Diante disso, alguns autores abordam a taxonomia do maquinário com foco nos processos aditivos e subtrativos precisam envolver critérios que abordam os equipamentos utilizados, materiais e outras variáveis. Chua *et al.* (2003) propõe um

modelo que se divide em quatro etapas: *Input* (entrada), que corresponde à entrada de informações para a modelagem dos elementos e fabricação do objeto físico. Esse processo utiliza dados de sistemas CAD ou modelos sólidos. Já a etapa *Method* (método) se baseia no modo como a peça será fabricada, podendo ser utilizados métodos como fotopolimerização, corte e colagem, união, fusão e solidificação, fusão e união, ou encadernação. Na etapa *Material*, escolhe-se a matéria-prima a ser empregada, podendo ser sólida, líquida ou em pó. Por fim, na etapa *Aplicações* (*Applications*), as peças são finalizadas ou refinadas de acordo com os elementos pretendidos, que podem ser agrupados em categorias como Projeto, Engenharia, Análise e Planejamento, e Ferramentas e Manufatura, conforme a Figura 26.

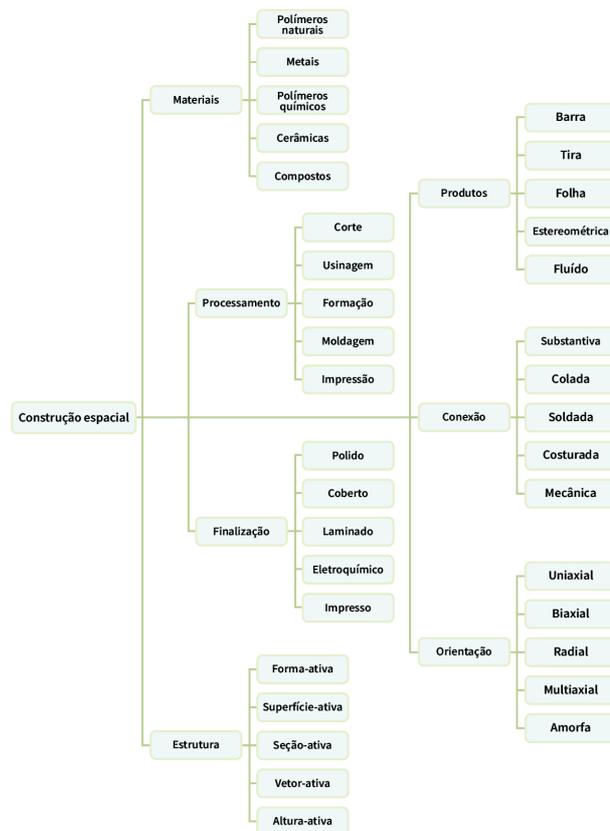
Figura 26 – Prototipagem rápida



Fonte: Adaptado de Chua *et al.* (2003)

No mesmo sentido, Vrouwe (2018; 2013) conduziu estudos que visam auxiliar no desenvolvimento de objetos. Essas taxonomias foram criadas com o objetivo de organizar os conceitos e sistematizar a construção espacial de experimentos de pesquisa e educação, além de fornecer uma estrutura clara e organizada para aprimorar o processo de construção física de modelos produzidos ou com processos paramétricos. O autor desenvolveu taxonomias relacionadas à construção física de modelos que são compostas de critérios que ajudam no agrupamento de variáveis. A metodologia utilizada foi dedutiva e indutiva, e possui diferentes formas de aplicação e enfoques, como materiais, estrutura e processos paramétricos. Desse modo, ele propõe uma hierarquia de critérios dispostos em temas interconectados, como ilustrado na Figura 27.

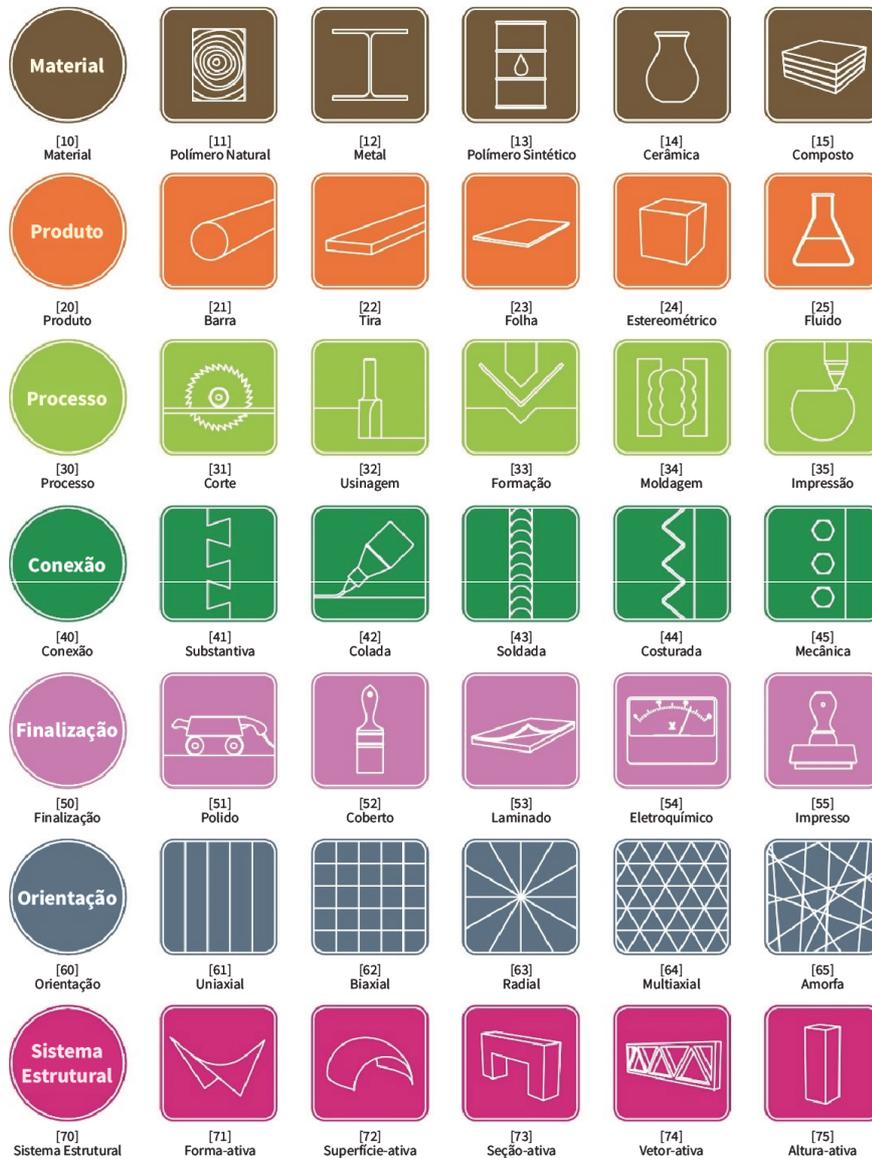
Figura 27 – Hierarquia de critérios taxonômicos



Fonte: Adaptado de Vrouwe (2018)

As categorias formuladas por Vrouwe (2018) para a taxonomia são “Materiais”, que são classificados conforme a composição utilizada, incluindo polímeros naturais, metais, polímeros sintéticos, cerâmicas e compósitos de madeira. Em “Produtos dos materiais”, aborda-se a geometria das peças, classificando-as em barra, placa, membrana, fluido ou estereométrico. Na categoria de “Processo do Material”, é contemplada a conexão entre as peças, seja ela subtraída, colada, soldada, costurada ou com fixador. Em “Finalização do material” aborda-se o tipo do acabamento, como polido, revestimento, laminação, eletromecânica e impressão. Em “Orientação” há os elementos classificados em unidimensional, bidimensional, radial, multidimensional e amorfo. Por fim vem o “Sistema Estrutural”, que compõe a forma ativa, a superfície ativa, seção ativa e vetor ativo e sistemas híbridos (Figura 28).

Figura 28 – Taxonomia para classificação de projetos

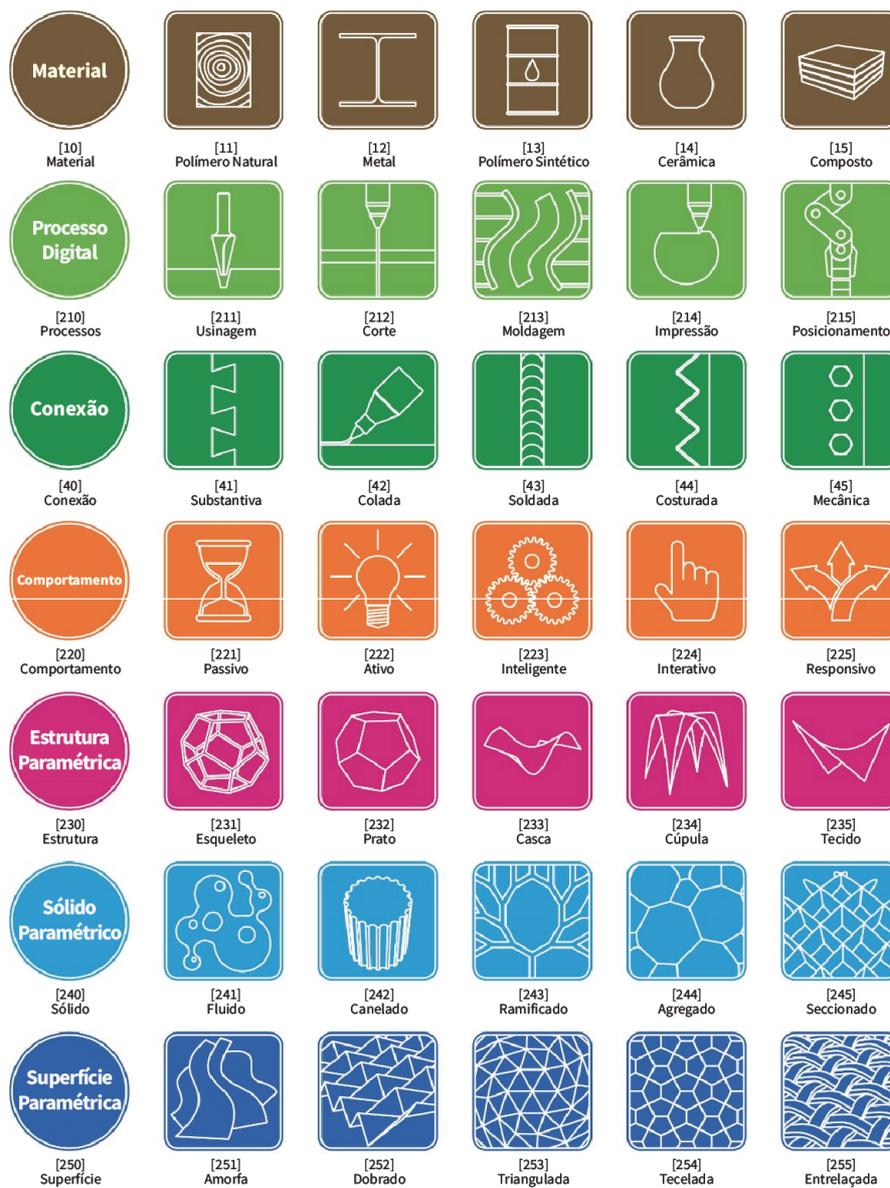


Fonte: Adaptado de Vrouwe (2018)

Vrouwe (2018) desenvolve taxonomias relacionadas à construção física de modelos que são compilados de critérios que auxiliam no agrupamento de variáveis. A classificação dos modelos na taxonomia é empírica e utiliza conceitos existentes, analisando como foram aplicados no modelo em questão. A metodologia utilizada é dedutiva e indutiva com diversas formas de aplicação e enfoques diferentes.

Diferentemente da taxonomia anterior, o autor adiciona as categorias de estruturas paramétricas (moldura, módulos, casca, arcos e têxteis), estruturas sólidas (fluída, estruturada, ramificado, mórfica e planos seriados) e superfícies paramétricas (amórfica, dobrada, triangulação, tesselação e têxtil), conforme a Figura 29.

Figura 29 – Taxonomia da construção espacial

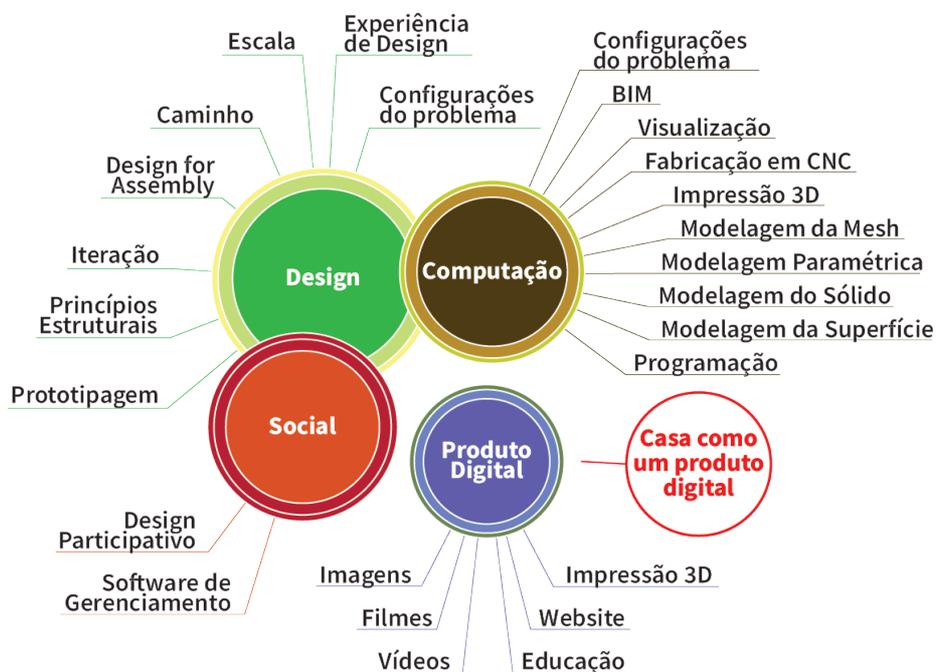


Fonte: Adaptado de Vrouwe (2018)

As taxonomias auxiliam no processo criativo dos projetistas para o desenvolvimento do objeto. Com isso, é possível produzir variações de um único elemento ou diversos elementos em vários estágios do projeto à medida que o conjunto de tecnologias é adicionado. Assim, essa ação de envolver a fabricação digital no processo projetual impacta também no ensino, à medida que as universidades começam a incorporar equipamentos de prototipagem rápida, os discentes podem se centrar menos nas características das máquinas e mais na natureza do processo de projeto. Desse modo, ela auxilia no âmbito do estudo da forma, a criação de espaço e a física dos materiais em relação aos processos de construção. Os métodos de prototipagem rápida auxiliam os métodos convencionais de modelagem e fabricação, reduzindo o tempo perdido na fabricação de simulações (SASS; OXMAN, 2006).

No MIT / EUA, Sass (2022) aborda que existem quatro esferas para fazer um objeto a partir da fabricação digital: projeto/design, computação, social e produto digital. A Figura 30 ilustra esses os critérios e como eles se relacionam com essas esferas: experiências de projeto, escala, interações, projeto para montagem, princípios estruturais, prototipagem, modelagem paramétrica, estruturas paramétricas, princípios de fabricação, participação colaborativa, impressão 3D entre outros. Todos os critérios abordados são relevantes para classificar e entender o processo da fabricação digital.

Figura 30 – Interações para a produção de um objeto



Fonte: Adaptado de Sass (2022)

Essas discussões revelam a importância da escolha adequada do maquinário, dos materiais e de critérios que influenciam o processo de projeto, se mostrando essenciais para o sucesso da fabricação digital. É necessário que os projetos sejam pensados de forma integrada, considerando as características técnicas e funcionais dos materiais, e que as estratégias de fabricação sejam adaptadas às necessidades específicas de cada projeto.

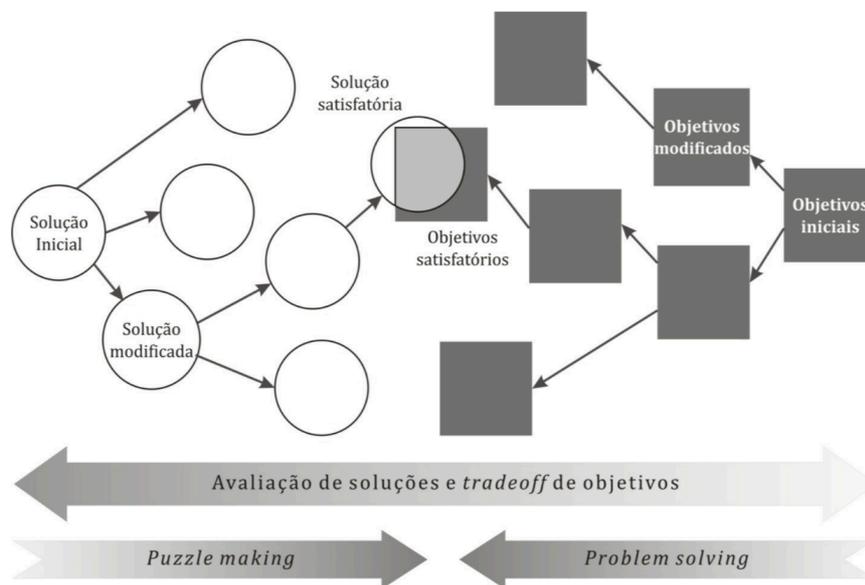
2.2.4. Taxonomias | Geometria

A complexidade do processo projetual para fabricação digital é sustentada pelas questões discutidas até o momento neste trabalho. Este tópico, por sua vez, se dedica a discutir os critérios que influenciam na concepção da forma e da geometria na fabricação digital. Esses critérios perpassam por fatores que envolvem o modo de chegar à forma, as técnicas de fabricação digital e a topologia de superfície.

Kalay (2004) explica que existem dois caminhos entre a concepção da geometria e da função no projeto: o primeiro é o "*problem-solving*" que busca uma forma para suportar a função desejada, guiado por objetivos e restrições, e requer habilidade de análise. E o segundo padrão é o "*puzzle-making*" que adapta as formas até atingir as qualidades desejadas, estabelecendo objetivos ao longo do processo, e requer uma síntese do que foi trabalhado.

É possível que uma mesma forma possa desempenhar várias funções, e uma função pode ser realizada por diferentes formas. Assim, considera-se que a relação entre a forma e a função pode variar dependendo do contexto em que estão inseridas, conforme a Figura 31 (KALAY, 2004).

Figura 31 – Relação entre objetivos e soluções de projeto



Fonte: Kalay (2004)

A busca sobre o pensar e o fazer projetual visa melhorar a qualidade do ambiente construído e seus processos. Os estudos sobre métodos de projeto visam a convergência entre forma e função, considerando as propriedades geométricas e materiais do sistema físico como úteis e funcionais. Encontrar uma relação causal entre forma e função levará ao desenvolvimento de um método aplicável, na maioria dos casos, em que a forma deva ser produzida para facilitar e apoiar um determinado conjunto de necessidades funcionais (KALAY, 2004).

Os métodos de concepção e representação do projeto propostos por Kalay (2004) podem ser vistos como uma maneira de atender à necessidade apontada por Oxman e Rosenberg (2007) de integração entre material e estrutura para alcançar uma forma desejada na fabricação digital.

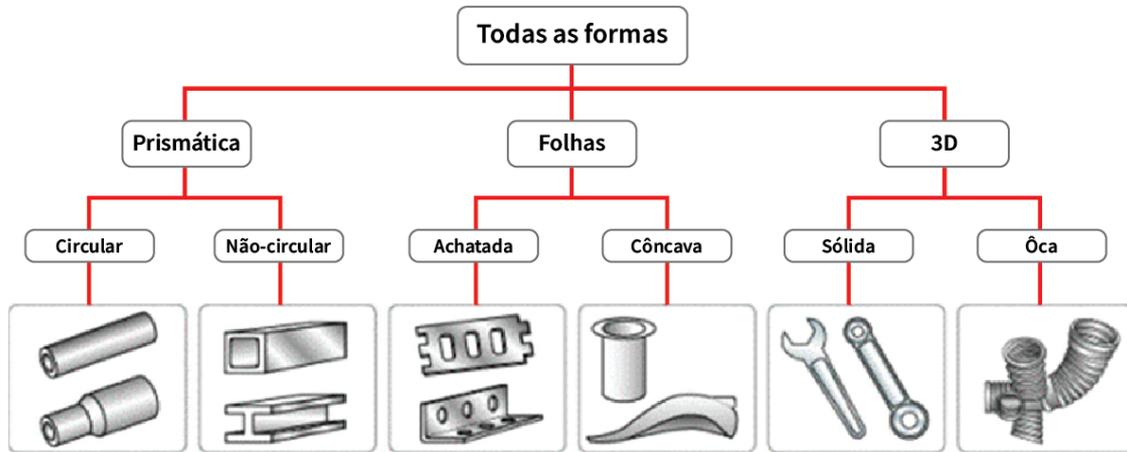
Segundo Kalay (2004), o uso de protótipos visa fornecer ao projetista um ponto de partida para o desenvolvimento de um novo projeto, utilizando teorias de busca,

limitadores, regras de projeto e casos como referências. Essas abordagens podem ser úteis para estabelecer uma relação mais coerente entre a forma, materiais e estrutura aplicados na fabricação digital.

No mesmo contexto, Agudelo *et al.* (2017) destaca que para otimizar a forma de um objeto, é necessário considerar diversos aspectos, como maximizar o desempenho ambiental e reduzir o custo, por meio do uso racional de material, equalizar o gasto de energia e emissões de CO₂ nas fases de transporte e uso, além de utilizar materiais que possam ser recicláveis e reutilizáveis. Porém, também deve-se considerar aspectos geométricos como características funcionais e formais, como tamanho, forma, complexidade, dimensões mínimas e máximas, tolerâncias, acabamento de superfície e quantidade de componentes a serem produzidos. O processo de escolha desses critérios é complexo e intrínseco, requerendo um alto nível de conhecimento sobre as características mecânicas e físicas dos materiais, bem como as possibilidades para fabricação, restrições e requisitos.

A discussão da geometria perpassa por uma classificação geral das formas, na qual à medida que se modifica resulta em alterações nos custos ou na fabricação. Agudelo *et al.* (2017) propõe que a geometria pode ser prismática, com variações para circular e não circular, em folha com variações para plana ou retorcida ou em 3d, que pode ser sólida ou oca, ver Figura 32.

Figura 32 – Tipos de geometria



Fonte: Adaptado de Agudelo (2017)

O agrupamento proposto foi sintetizado em duas categorias: curva e formas ocas. A partir delas é possível ter variações no eixo de rotação, a seção transversal, densidade e espessura do objeto e fechamento da forma. Dessa maneira, Agudelo *et al.* (2017) classifica as possíveis formas geométricas desses elementos na Figura 33.

Figura 33 – Taxonomia para formas

Peça	Eixo Preferencial	Seção Transversal	Espessura	Limite	Detalhes
Ôca	Reto	Constante	Simples	Plano	Com detalhes superficiais
				Curvo	
Sólida	Curvo	Variável	Complexa	Circular	Sem detalhes superficiais

Fonte: Adaptado de Agudelo (2017)

O autor exemplifica como taxonomia funciona ao ser empregada como classificação. A Figura 34 mostra a seção do objeto, a Figura 35 ilustra o detalhamento na superfície que envolve a superfície, a Figura 36 contém a espessura do objeto e a Figura 37 a seção transversal.

Figura 34 – Exemplos de fechamento

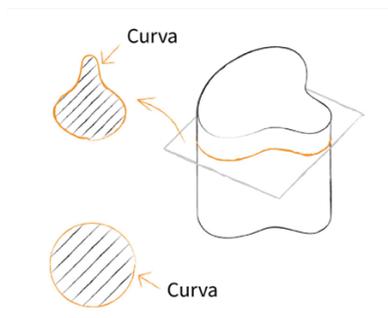


Figura 35 – Detalhamento da superfície

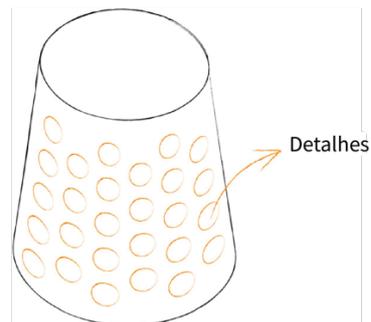


Figura 36 – Espessura do objeto

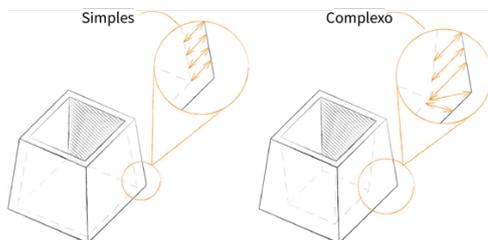
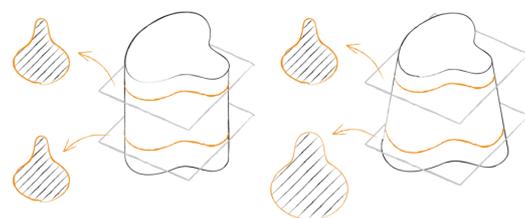


Figura 37 – Seção transversal



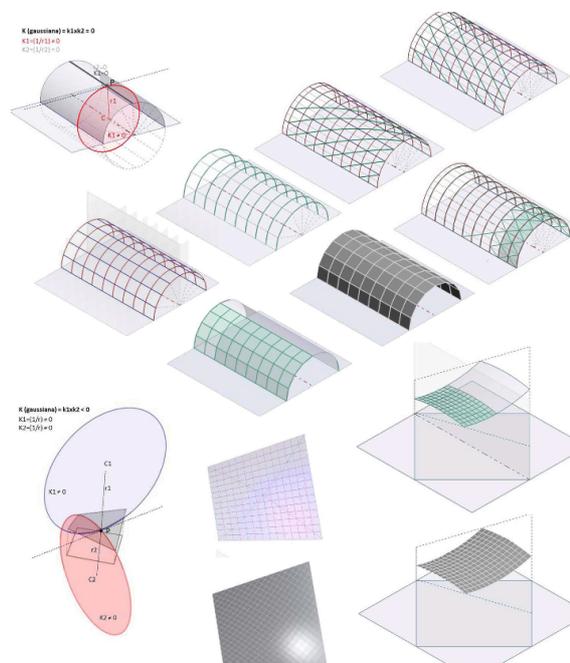
Fonte: Adaptado de Agudelo (2017)

Além das geometrias propostas e os critérios para as variações, Lanzara (2015) e Capone *et. al*(2018) discute os arranjos possíveis para revestir uma superfície a partir de da fabricação digital. As autoras abordam alguns fatores que influenciam a escolha da forma, tais como: restrições de fabricação, consumo de material, desempenho estrutural, estética e custo. A topologia de uma superfície pode afetar o processo de fabricação e a viabilidade processos de fabricação, sejam eles aditivos ou subtrativos. Além disso, pode modificar a quantidade de material para a fabricação, bem como a

eficácia do uso do material. A superfície também influencia na resistência, na estabilidade e no desempenho de um objeto fabricado, a partir da capacidade de resistir às tensões e deformações. Assim, a otimização de topologia das superfícies é um dos meios que permite aos projetistas criar formas e estruturas únicas, porém, a complexidade da topologia pode afetar o custo de fabricação, pois pode exigir técnicas e materiais mais avançados.

Lanzara (2015) observa que o revestimento de um objeto depende da natureza geométrica das superfícies, e propõe o uso da geometria diferencial para a panelização das superfícies, reduzindo assim o custo de produção. Então, a forma como uma superfície é curvada afeta a maneira como ela é dividida em partes menores: quando as principais linhas curvas são identificadas, é possível criar peças menores tanto em forma de triângulos quanto em forma de quadrados (Figura 38).

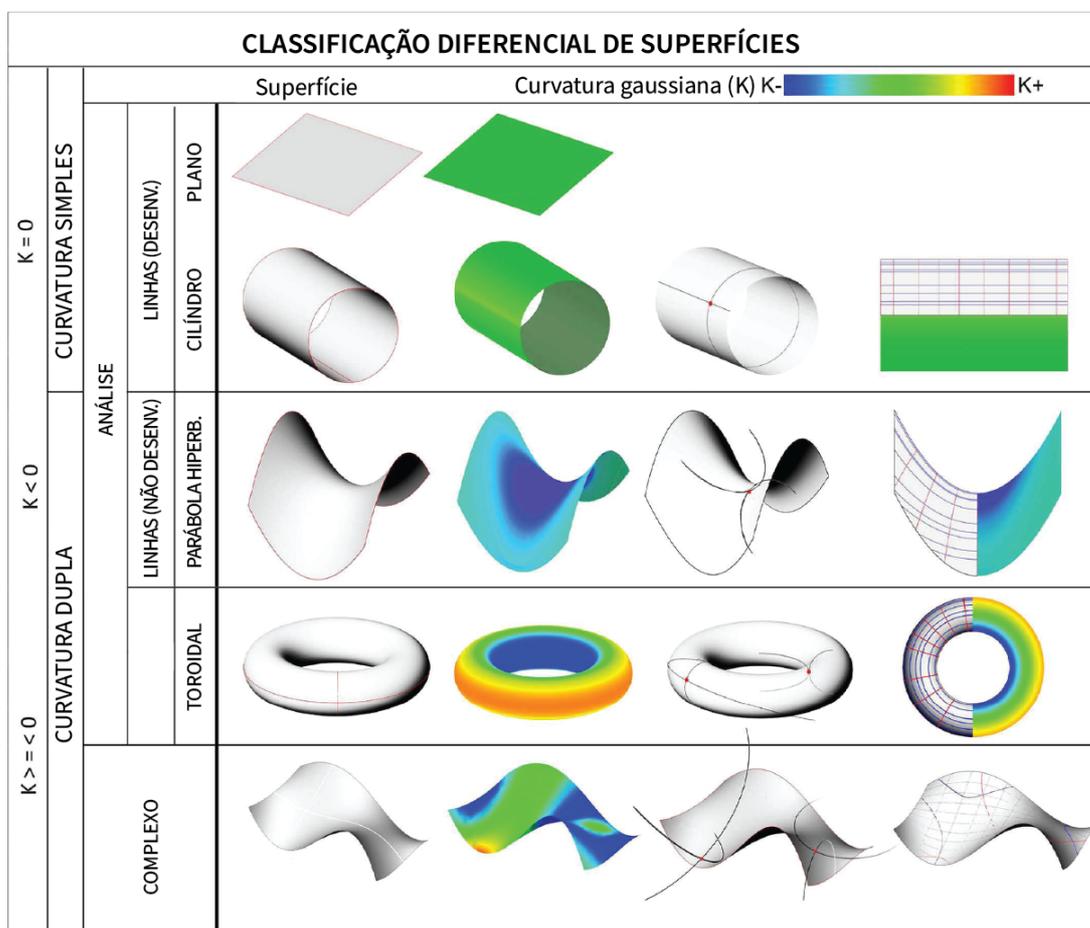
Figura 38 – Panelização das superfícies



Fonte: Lanzara (2015)

As superfícies podem ser classificadas com base na curvatura total que permite uma sistematização gráfica que inclui planos, cilindros, parabolóides hiperbólicos e toridal. Estas superfícies auxiliam na otimização das formas da geometria, assim tem-se a classificação de três tipos: forma livre, com curvatura simples ou dupla curvatura, conforme a Figura 39.

Figura 39 – Classificação das curvaturas



Fonte: Adaptado de Lanzara (2015)

Ainda nesse contexto, Iwamoto (2009) apresenta modos de produzir as superfícies e objetos a partir da fabricação digital. A autora explora cinco técnicas de fabricação digital: seccionamento, tesselação, dobra, contorno e formação, que podem

ser fabricadas por corte a laser, CNC (controle numérico computadorizado), modelagem 3D e impressão 3D. Essa combinação auxilia a criar formas complexas e personalizadas, bem como para melhorar a eficácia da produção a partir da combinação entre duas ou três técnicas.

A primeira técnica é o plano seriado ou o seccionamento (*sectioning*) que simplifica a construção de objetos complexos com formas curvilíneas na fabricação digital. O conceito de planos seriados consiste em dividir um objeto ou superfície em seções planas sequenciais que são cortadas com precisão por equipamentos de usinagem controlados por computador. As seções planas são então encaixadas para formar o objeto arquitetônico desejado. Essa técnica permite a criação de objetos detalhados e complexos, que seriam difíceis de produzir de outra forma, além de possibilitar o uso eficaz de materiais e reduzir o desperdício, conforme a Figura 40 (IWAMOTO, 2009).

Figura 40 – One Main Office.



Fonte: Archdaily (2020)

Segundo Sass (2022), o conceito de planos seriados também pode ser empregado em outras técnicas, como o "Contorno" - capaz de transformar uma figura 3D em seções

2D a partir de eixos transversais (Figura 41); "empilhado" (ou "*stack*") - que divide a figura 3D em peças menores para serem sobrepostas e criar a forma (Figura 42); e "Hash" - que transforma as peças 3D em um esqueleto de formas planares em 2D conectadas por meio de encaixes (Figura 43).

Figura 41 – Contorno

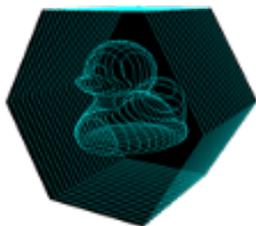
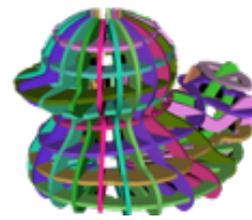


Figura 42 – Empilhado | *Stack*



Figura 43 – Esqueleto | *Hash*



Fonte: Sass (2022)

A técnica de tesselação (*tesselation, tiling*) é uma maneira de simplificar padrões geométricos, tornando-os mais fáceis de serem aplicados em elementos ou na envoltória da edificação. Esses padrões podem ser modulares (Figura 44) ou com peças de quebra-cabeça (Figura 45), e tanto as planificações em formas retas quanto a modelagem auxiliam no processo de execução, o que facilita a redução do tempo e a aplicabilidade dos materiais, ver Figura 46.

Figura 44 – Modulação



Figura 45 – Plate / Prato



Fonte: Sass (2022)

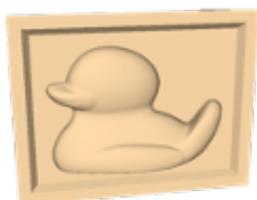
Figura 46 – Airspace em Tokyo



Fonte: STUDIO (2020)

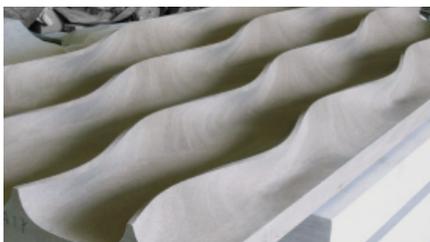
O contorno é um processo utilizado na fabricação digital quando se deseja produzir formas ou geometrias que resultam de uma escultura (Figura 47). Esse método é útil na produção de moldes e formas que podem ser aplicados em produções em massa ou nos elementos capazes de serem repetidos. Nesse processo, a conformação é realizada pela subtração de formas em materiais distintos, com espessuras e cores variadas (Figura 48). Além disso, ela pode ser alcançada a partir da técnica de contorno - que produz as fôrmas - e, após isso, é preenchida com material que será a geometria, conforme ilustrado na Figura 49 (DUNN, 2012; IWAMOTO, 2009).

Figura 47 – Relevô



Fonte: Sass (2022)

Figura 48 – Contorno



Fonte: Iwamoto (2009)

**Figura 49 –
Formação**



Fonte: Sass (2022)

A dobra (*folding*) é uma técnica de fabricação digital que permite transformar superfícies bidimensionais em objetos tridimensionais através da produção de vincos no material (Figura 50). A criação de objetos dobrados também auxilia nas técnicas de origami (Figura 51) ou *Kerf Bending* que utiliza vazios para dobrar o material, conforme a Figura 52. A vantagem é permitir a combinação de diferentes materiais e escalas para gerar objetos tridimensionais complexos e menor uso de encaixes (CAPONE; LANZARA, 2019; DUNN, 2012; IWAMOTO, 2009).

Figura 50 – Terminal Internacional de Yokohama

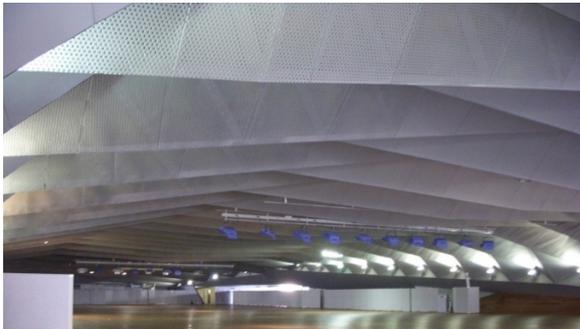


Figura 51 – Pavilhão do Japão



Fonte: ArchDaily (2020)

Figura 52 – Kerf Bending



Fonte: Hoffer et. al (2012)

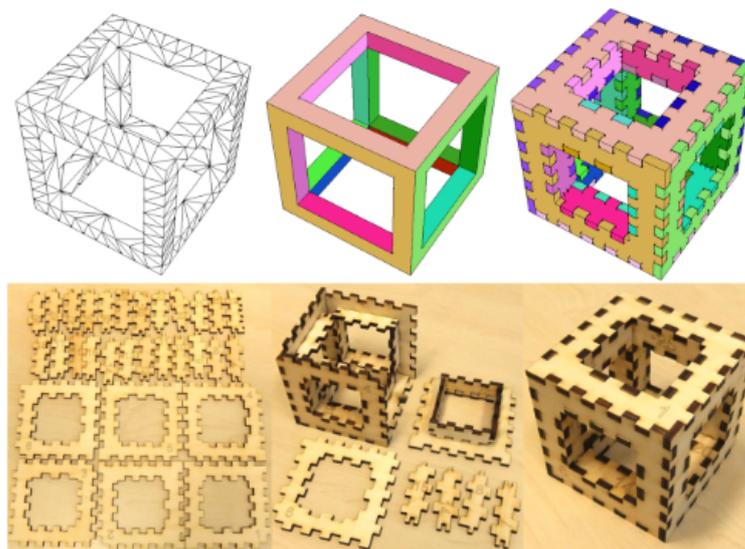
As formas de concepção para fabricação digital oferecem uma grande variedade de possibilidades na criação de geometrias complexas para objetos. Para isso, as uniões

são a peça-chave na montagem e desmontagem de elementos, as quais podem ser feitas com o mesmo material ou material diferente do objeto principal. Os meios mais comuns para união entre elementos incluem colagem, soldagem, encaixe e parafusamento; cada uma com suas particularidades em relação ao material e ao processo de fabricação adotado. Esses critérios variam de acordo com a natureza do material, suas propriedades físicas e químicas, bem como da finalidade do objeto a ser produzido. O uso adequado de uniões promove a estabilidade da forma, na curvatura e garante a resistência da peça.

Cada projeto concebido requer um conjunto específico de encaixes que atenda às necessidades listadas. Esses encaixes são influenciados pelos materiais, geometria do modelo e maquinário utilizado na fabricação. Na área da prototipagem rápida, as uniões podem levar a novas formas de concepção com foco na montagem. Dessa forma, os objetos podem ser inicialmente pensados e criados como ideias, para depois verificar como serão construídos, seja como objetos separados ou como um conjunto completo de objetos. Com isso, novos métodos de encaixe e, conseqüentemente, de montagem podem surgir a partir de restrições físicas e visuais (SASS; OXMAN, 2006).

Diante disso, Chen *et. al* (2016) apresentam uma abordagem para tornar a montagem mais fácil e eficaz. Eles discutem o método “*Fresh Press modeler*”, que transforma as geometrias concebidas em 3D em formas planificadas, facilitando o corte em processos subtrativos e a conseguinte montagem. Com essa ferramenta, é possível controlar a espessura do material e o formato dos encaixes para alcançar a forma tridimensional (Figura 53).

Figura 53 – Superfícies planas geradas por *Fresh Press Modeler*



Fonte: Chen *et. al*/(2016)

O uso da fabricação digital também auxilia no processo de concepção projetual, o que facilita a montagem no local. Para isso, após conceber a forma é necessário determinar os padrões de corte e analisar a eficácia dos encaixes. Assim, a partir dos modelos tridimensionais é possível antever a localização de cada componente, ou ainda mover e fixá-los em outros lugares com precisão (KOLAREVIC, 2001).

Similar conteúdo é visto no projeto do arquiteto Shigeru Ban no “Edifício Comercial Tamedia” (Figura 54), esse projeto foi elaborado um sistema de encaixe único sem utilizar pregos ou parafusos (Figura 55 e Figura 56). As peças e as uniões foram previamente fabricadas, o que possibilitou montar a estrutura de modo que ela se seja autotravada com pinos de madeira. Estes pinos foram desenvolvidos para sustentar os pórticos da estrutura e dar durabilidade ao conjunto, conforme a Figura 57 (BAN, 2013).

Figura 54 – Edifício Comercial Tamedia



Figura 55 – Sistema de encaixes



Figura 56 – Encaixe da estrutura



Figura 57 – Estrutura do edifício



Fonte: (BAN, 2013).

Ainda no âmbito da fabricação digital há casos que são utilizados encaixes híbridos para a montagem. Ou seja, as uniões são feitas com um material diferente do objeto principal. Um exemplo é o projeto “*Digital Bamboo*”, ele combina uma estrutura de bambu com conectores fabricados em uma impressora 3D (Figura 58). Para determinar os encaixes, as peças de bambu foram cortadas em uma máquina de CNC e, em seguida, conectores foram utilizados para estruturar a peças em várias direções, conforme a Figura 59.

Figura 58 – Estrutura da Digital Bamboo



Fonte: DBT (2023)

Figura 59 – Conectores das peças fabricados em 3D



Existem várias possibilidades de encaixes em um objeto arquitetônico, e cada combinação de materiais ou de geometria gera uma biblioteca de possibilidade de encaixes. Nesse contexto, Sass (2007) dedica-se a estudar as conexões entre peças planas para criar formas tridimensionais. Dessa maneira, o autor formula uma taxonomia de encaixes a partir das superfícies em uma forma para edifícios, conforme a Figura 60.

Figura 60 – Taxonomia de tipos de superfícies e conexões de edifícios

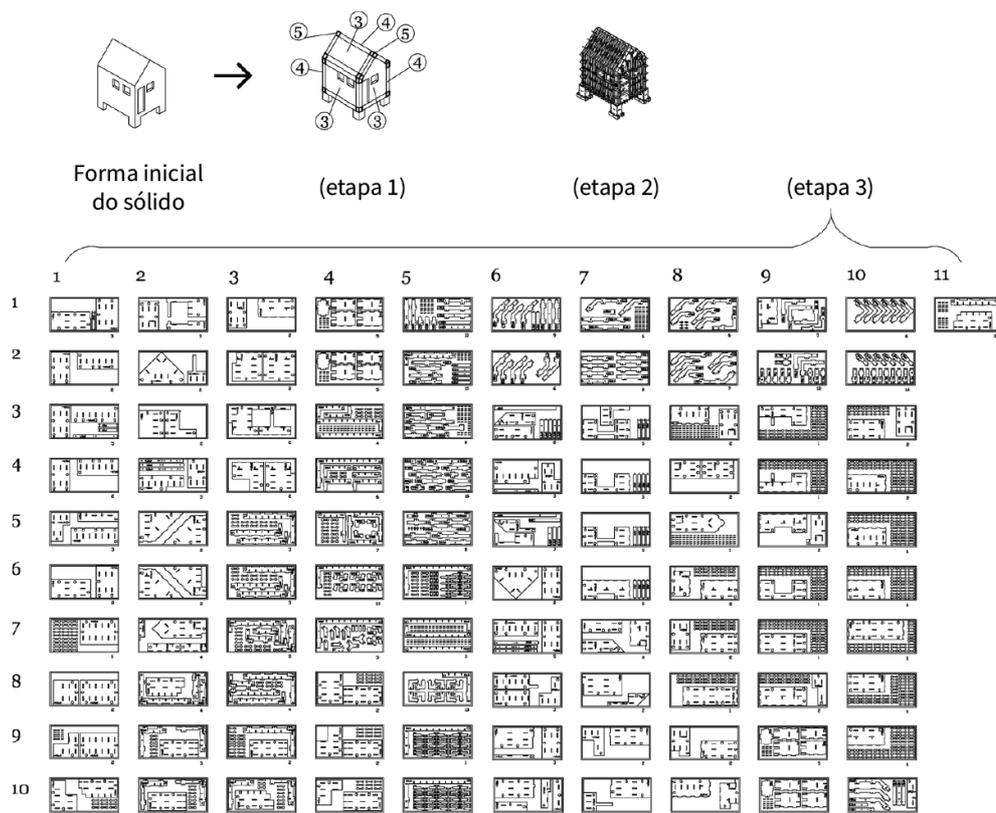
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
	representação de superfície	Conjunto de encaixes	Dado	Descrição da Viga	Viga
Parede					
Junção parede-teto					
Canto					
Conexão em T					
Cruzamento					
Parede angulada					
Montagem da parede					
Montagem da parede					

Fonte: Adaptado de Sass (2007)

Nos trabalhos desenvolvidos por Sass (2022) no grupo de pesquisa do DDF/MIT (2023) destaca-se os projetos da *Instant House* (SASS; BOTHA, 2006), Casa em New Orleans (2020), o H22 – Projetos de abrigo “*Shelter Design*” (2023) e o software que auxilia

a planificação das peças a partir das técnicas empregadas, denominado *Luban 3d*. Em sua maioria, os projetos fabricados na escala real pelo DDF, utilizam o princípio da planificação das peças. Onde os objetos grandes foram divididos em partes menores para facilitar a fabricação das peças, seja pelo maquinário ou pela limitação dimensional do material. A Figura 61 como é realizado esse processo: inicia-se com o sólido inicial, no estágio 1 é identificada as faces e estrutura da forma, no estágio 2 as peças são divididas em elementos menores para fabricação e por fim, no estágio 3 há a planificação e agrupamento das peças nas placas que serão submetidas ao processo subtrativo de corte (SASS, 2022).

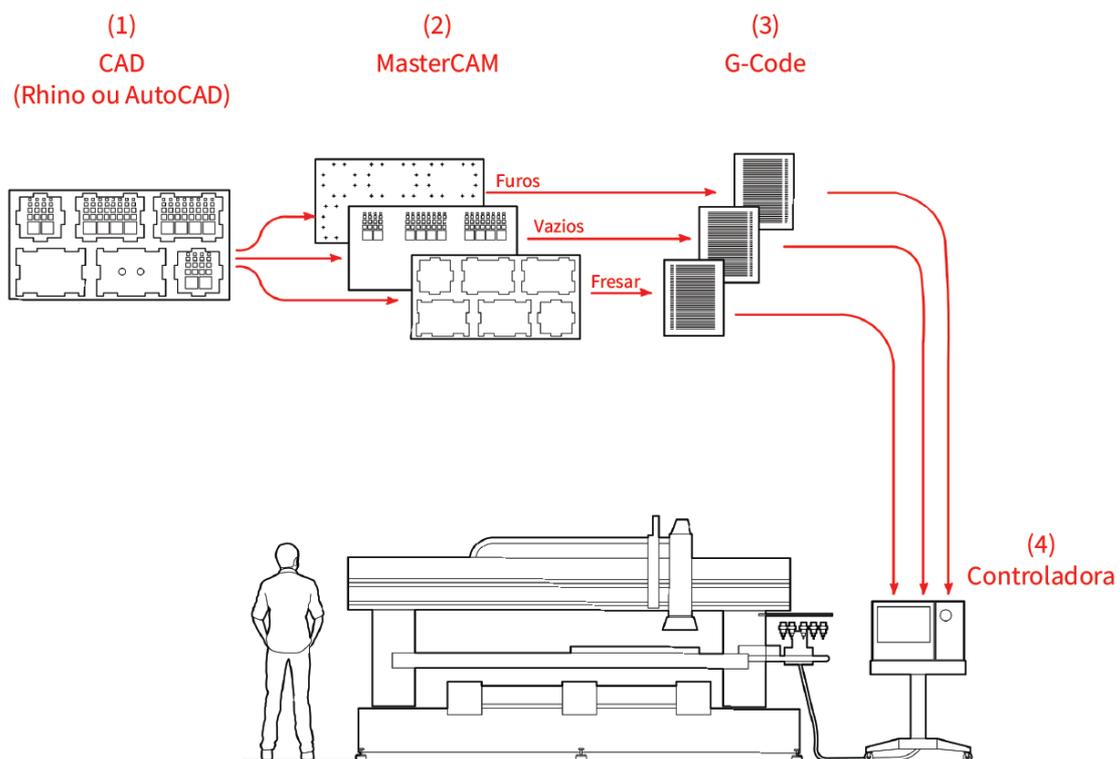
Figura 61 – Planificação das formas tridimensionais



Fonte: Adaptado de Sass (2007)

No contexto da fabricação, destaca-se a importância de calibrar o eixo que ferramenta usa para cortar a peça (denominado de “eixo de passo” ou “*Tool path*”), ele é gerado por meio de um software de CAM (Manufatura auxiliada por computador ou *Computer-Aided Manufacturing*) que converte o modelo 3D do objeto, separando em camadas de acordo com o tipo de geometria e gera em uma série de instruções para viabilizar o movimento da ferramenta de corte (Figura 62). Essas instruções consideram a geometria da peça e do corte, o tipo de material utilizado e o tipo de ferramenta utilizada, para garantir que a fabricação seja precisa e eficaz (SASS, 2022).

Figura 62 – Tradução do desenho para a máquina de corte



Fonte: Adaptado de Sass (2022)

Ainda no sentido de otimizar o corte das peças pelo maquinário, Griz *et al.* (2017) destacam a importância desse aspecto ao citar o projeto da Casa Nordeste (2020). Nesse

sentido, a geometria dos pórticos, a modulação e os encaixes são apresentados como critérios que podem ser incluídos para auxiliar o projetista na fase de corte e montagem das estruturas, gerando impactos significativos na eficácia do processo de fabricação e na redução de desperdícios. Esses parâmetros podem ser definidos com base nas dimensões da placa de compensado e na espessura utilizada, visando a otimização do corte. O Quadro 1 apresenta as informações sobre esses critérios e sua aplicação no contexto da fabricação digital.

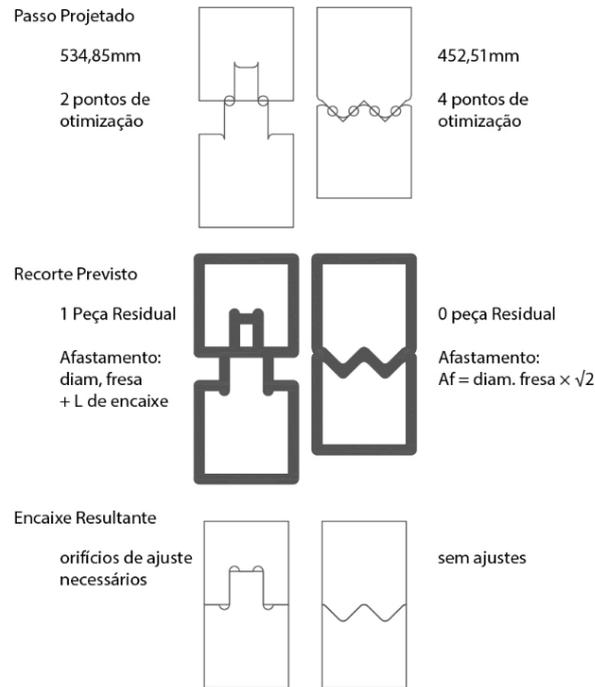
Quadro 1 – Critérios de construção

Inputs iniciais: dimensão da placa de compensado e espessura		
Parâmetros em cada fase		
Geometria dos pórticos	Modulação	Encaixes
-Altura do ambiente; -Inclinação da cobertura; -Tamanho do beiral -Seção do pórtico (largura).	-Sequência de pórticos para colagem; -Número e distância entre pórticos; -Largura do ambiente.	-Largura da zona destinada aos encaixes.;

Fonte: Griz et al. (2017)

No âmbito dos processos subtrativos, Griz *et al.* (2017) aborda que o projeto deve seguir o padrão de corte que foi modelado digitalmente e otimizado para reduzir os desperdícios de peças, tempo e custos. A otimização do caminho percorrido pela ferramenta é essencial para evitar cortes desnecessários. Para isso, são considerados o diâmetro da fresa, os ângulos de encaixe e os ajustes de passo para encaixe, conforme ilustrado na Figura 63.

Figura 63 – Eixo de passo ou *tool path* para encaixes



Fonte: Griz *et al.* (2017)

No âmbito dos processos aditivos, a construção de peças requer a criação de dois caminhos distintos um caminho externo (Figura 64) e outro interno (Figura 65); seguido pelo preenchimento da forma (Figura 66). O eixo do passo pode influenciar no modo de construção das peças e qualquer variação pode influenciar na montagem do objeto final. Assim, a precisão e a eficácia na geração desses caminhos têm uma influência direta na qualidade da peça produzida, além de otimizar o tempo e reduzir custos no processo de fabricação (SASS, 2022).

Figura 64 – Caminho externo

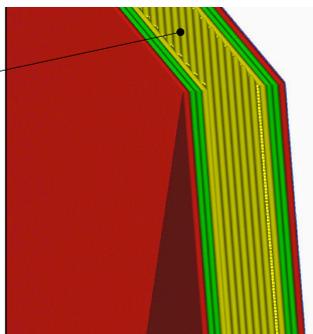


Figura 65 – Caminho interno

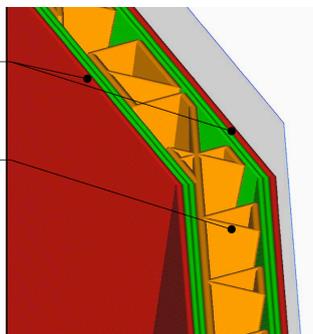
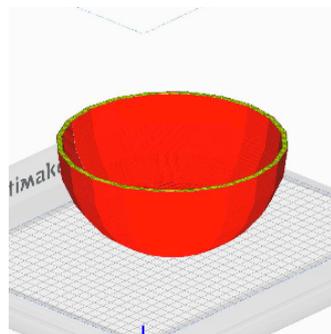


Figura 66 – Produto final



Fonte: Sass (2022)

A utilização das taxonomias que abordam a geometria é uma importante ferramenta no âmbito da fabricação digital, uma vez que possibilita a identificação de padrões e características específicas de cada forma, permitindo a otimização do processo de fabricação. A compreensão das diferentes geometrias pode levar a peças mais precisas, eficazes e com redução de custos. Além disso, o estudo dessas geometrias é fundamental para a criação de modelos 3D (seja por meio dos processos aditivos ou subtrativos) com precisão e qualidade; o que auxilia na fabricação de estruturas complexas.

2.3. Considerações sobre o capítulo

Neste capítulo foi apresentada base teórica que sustenta a pesquisa e o desenvolvimento da ferramenta que relaciona a fabricação digital com a materialização arquitetônica. Discutiu-se os conceitos que embasam o processo projetual na arquitetura, o *Design Thinking* como abordagem de projeto, o pensamento sistêmico aplicado às etapas de projeto e as taxonomias pertinentes no contexto do

desenvolvimento da ferramenta.

O objetivo desse item foi destacar como os critérios das taxonomias, presentes na literatura científica, auxiliam na construção de uma estrutura taxonômica que considere as especificidades da fabricação digital para a materialização arquitetônica. A síntese aborda critérios que auxiliam na concepção da forma e da geometria na fabricação digital, incluindo fatores que influenciam na concepção da forma, desenvolvimento da solução, técnicas de fabricação digital e topologia de superfície. Esses fundamentos teóricos sustentam a pesquisa e embasam a ferramenta que relaciona fabricação digital e materialização arquitetônica.

No primeiro tópico, foram explorados diversos aspectos do processo de projeto em arquitetura. Schon (2000) destaca a importância da reflexão crítica e da combinação do conhecimento técnico com a habilidade de criar soluções significativas. Kowaltowski (2011) e Lawson (2011), explicam que as etapas do processo criativo - análise, síntese e avaliação - são cíclicas e dinâmicas, podendo ser repetidas diversas vezes dependendo do problema em questão. Por sua vez, Cross (2011) destaca a complexidade do processo de projeto, que envolve diversas habilidades, estratégias, pesquisa, colaboração e reflexão. Estes autores enfatizam a importância da ciclicidade no processo de desenvolvimento de um projeto de arquitetura, permitindo que os projetistas possam revisar etapas ou decisões do projeto. Além disso, Lawson (2011) ressalta o papel das restrições projetuais durante o processo de projetar sob limitações. Os autores também explicam que o processo de projeto é complexo e surge a partir de uma combinação de diferentes condições. Então, ao desenvolver uma ferramenta aplicável na fabricação digital, é essencial assimilar a importância da ciclicidade das decisões, possibilidade de revisar as decisões tomadas e, a atuação das limitações no projeto como características para o embasamento da ferramenta.

O referencial teórico também aborda como as tecnologias digitais podem influenciar no processo projetual, introduzindo novos modos de pensar o projeto. Nesse capítulo, destaca-se o pensamento do projeto concebido digitalmente e baseado no material, fabricação, desempenho, custo e o pensamento paramétrico. Esses critérios adicionam complexidade ao desenvolvimento do projeto e são essenciais para o processo projetual concebido através da fabricação digital.

Ao discutir o processo do projeto com foco no pensamento sistêmico, as taxonomias apresentadas abrangem desde a ideia até a materialização da obra, passando pelas etapas processuais e geometria. Bax *et.al* (2000, 2002; 1996) e Agudelo *et.al* (2017) abordam as características predominantes da forma, função, tempo e materiais e os critérios para fabricação do modelo. Por outro lado, Chua *et al.* (2003), Ashby (2013; 2019), Kowaltowski *et al.* (2011) e Vrouwe (2018) dissertam sobre os caminhos para iniciar um projeto e as etapas para coletar informações. Esses dados auxiliam no processo de tomada de decisão e dependem do contexto de inserção do projeto, tais quais: questões “socioeconômicas”, “científica”, “profissional”, “estética” ou ainda “tempo” e “estabilidade”.

Agudelo *et. al*(2017), Ashby *et. al*(2019) Gebhardt (2011-) e Sass (2010) discutem o processo de concepção do projeto e como a forma está relacionada diretamente ao material escolhido, a escala e espessura do elemento a ser desenvolvido. Lanzara (2015) e Iwamoto (2009) explicam também como diversidade de materiais afeta a topologia das superfícies e as técnicas de concepção por meio da fabricação digital, nas quais o projetista deve considerar o impacto da superfície nas restrições de fabricação, consumo de material, desempenho estrutural, estética e custo ao projetar.

No mesmo sentido, Vrouwe (2018) e Agudelo (2017) abordam que ainda no processo projetual é possível estimar o impacto ambiental, através de variáveis que

afetam o desempenho ambiental e estrutural do elemento, isso pode ser determinado a partir de processos paramétricos. Sass e Botha (2006) discutem como as decisões de projeto influenciam nos custos das peças e no tempo de montagem, produção e fabricação. Ashby (2013; 2019) adiciona os impactos do tempo, energia, custo e, assim como Agudelo (2017), ressalta a questão sobre desperdício de materiais. Essas escolhas impactam na reciclabilidade, reutilização, transporte, viabilidade da fabricação e a eficiência energética dos materiais.

Os materiais, por sua vez, são um assunto abordado pelos pesquisadores Ashby (2013; 2019) e Agudelo (2017) que selecionam e categorizam os materiais passíveis de serem aplicados a experimentos de projeto. Esses materiais afetam a fabricação e o modo que o maquinário vai interagir com ele, seja mediante a processos aditivos ou subtrativos. O enfoque no maquinário é relevante, pois além de afetar o custo, tempo e energia; também influencia no corte das peças pelo eixo do passo (*tool path*). Sass e Oxman (2006) e Griz *et al.* (2017) enfatizam que para alcançar o baixo custo e pouco resíduo, deve-se buscar utilizar materiais locais, otimização da geometria das peças estruturais, flexibilidade do modelo, modulação e uma preocupação nas uniões.

Nas etapas projetuais formuladas para prototipagem rápida, destacam-se as etapas enumeradas por Jacobs (1992), Cooper (2001), Chua *et al.* (2003), Pupo e Celani (2009) e Gebhardt (2011), que consideram o modelo como ponto de partida para a prototipagem das peças; seguido por etapas para o desenvolvimento, pós-produção e acabamento das peças. Gebhardt (2011-) destaca que a seleção dos materiais é responsabilidade do projetista e ele deve deter o conhecimento das interações entre o desenho, a máquina e protótipo; cabendo a ele decidir a melhor combinação. Chua *et al.* (2003) destacam os modelos de entrada (tipos de arquivo), materiais, métodos e aplicações para a prototipagem rápida. Similar conteúdo é abordado por Pupo (2008)

que caracteriza os processos de produção automatizada, escala e o modo de fabricação e como isso afeta na fabricação do elemento.

Essas discussões são fundamentais para a construção de uma ferramenta que relacione a fabricação digital e a arquitetura. Embora, as taxonomias apresentadas classifiquem elementos e edificações construídas, elas são úteis para a construção de critérios relevantes para fabricação digital e materialização arquitetônica. As taxonomias destacam diferenças entre critérios e auxiliam a encontrar há um ponto em comum entre várias taxonomias, permitindo a sintetização dos critérios que podem ser aplicados no processo projetual voltado para fabricação digital. Sendo fundamental para o desenvolvimento do processo projetual e possibilitando explorar a criação de objetos inovadores, que atendam às necessidades e demandas da sociedade atual.

3. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA

Esse capítulo disserta sobre as etapas A, B, C e D descritas nas diretrizes metodológicas (item 1.2). Apresenta-se nesse tópico, os resultados referentes as revisões sistemáticas de literatura, a caracterização dos critérios para o desenvolvimento teórico conceitual da taxonomia e, a análise de conteúdo, como um dos passos do processo de validação. Além disso, explica o modo de funcionamento da Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+arch) em uma ferramenta disponível *online*.

As RSLs foram essenciais para identificar a lacuna na literatura científica, o que permitiu a definição da questão de pesquisa, dos objetivos e da motivação. As revisões foram embasadas nas etapas descritas por Tranfield (2003) que identificaram os artigos relevantes e foi possível analisá-los sob a ótica da fabricação digital. As revisões também caracterizaram a temática das taxonomias encontradas na literatura e foi possível fundamentar os passos para o desenvolvimento da taxonomia (RSL 2).

À medida que os critérios foram sendo descobertos, eles foram sintetizados e testados em estruturas gráficas para auxiliar no desenvolvimento da taxonomia que resulta na forma final da TDFab+Arch, como descrito no item 3.2. Whittaker e Breininger (2008) e Fraunhofer ISST (2009) embasam o desenvolvimento e criação da taxonomia, como descrito nas diretrizes metodológica e no processo de validação interna (item 1.3).

O processo de validação iniciou nesta tese e, para isso o primeiro passo da validação interna consistiu em realizar indagações retóricas para verificar a aplicabilidade dos critérios na arquitetura e em experimentos que envolvem fabricação digital. Assim, indagou-se sobre a utilidade da estrutura para os projetistas, a compreensão dos critérios disponíveis e o processo de fabricação digital relacionado a

esses critérios. Essas questões e possíveis aplicações da taxonomia no processo de projeto e para catalogação de projetos concluídos foi realizada no Laboratório de Modelos + Prototipagem (LM+P / UFPB). Além disso, à medida que a taxonomia foi sendo estruturada, os critérios foram confrontados na literatura científica por meio da análise qualitativa de conteúdo, embasada pela metodologia de Krippendorff (2004). Esta etapa consistiu no segundo passo do processo de validação interna e dissertada no item 3.3.

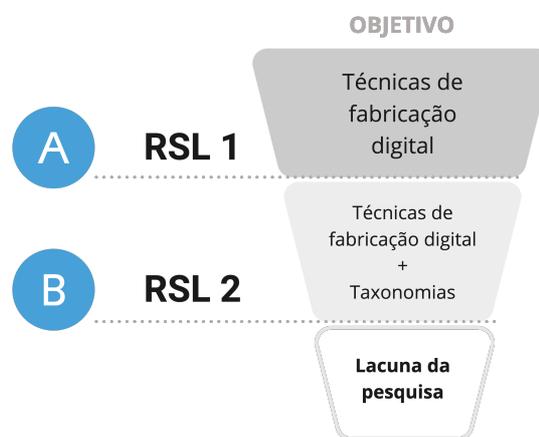
Essa etapa auxiliou no agrupamento dos critérios em categorias e critérios e assim, embasou o último desse capítulo que é: Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch), descrito no item 3.4. A TDFab+Arch é uma ferramenta voltada para projetistas que envolve critérios envolvidos para auxiliar no processo de projeto que busca a materialização por meio da fabricação digital. Além disso, essa taxonomia auxilia no processo de catalogação dos projetos concluídos. O processo de validação e estruturação da TDFab+Arch foi influenciada pelo período doutoral que a autora esteve no MIT / EUA. A partir do acesso as referências bibliográficas, laboratórios e componentes curriculares. Bem como, reuniões no grupo de pesquisa que embasaram o desenvolvimento e entendimento dos critérios, que consequentemente culminaram na TDFab+Arch.

3.1. Revisão sistemática de literatura (RSL)

Este item disserta sobre as duas revisões sistemáticas de literatura (RSLs) realizadas que compõem, os procedimentos técnicos dos objetivos específicos II e II na qual corresponde a fase de “compreensão” da pesquisa, conforme o tópico 1.1. As RSLs também são descritas nas etapas A e B da abordagem metodológica, no item 1.2.

As RSLs tiveram objetivos distintos: a primeira RSL (denominada de RSL1) objetivou caracterizar como é realizado o processo de projeto de materialização arquitetônica a partir as técnicas de fabricação digital de Iwamoto (2009) no âmbito da arquitetura. Enquanto, a segunda RSL (RSL2), foi realizada com o objetivo de aprofundar e afunilar a pesquisa na literatura científica, buscando estruturas sistematizadas que descrevam o processo de projeto com foco na fabricação digital, conforme (Figura 67).

Figura 67 – RSLs e a lacuna



Fonte: Autoria própria

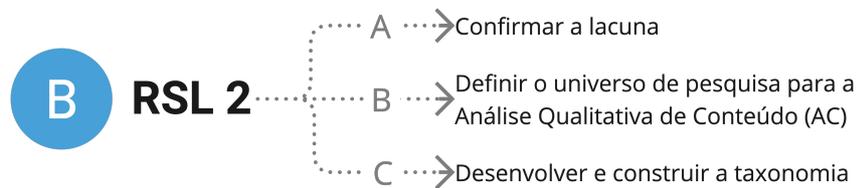
Desse modo, a primeira RSL explorou qual seria a lacuna da pesquisa e a segunda RSL confirmou que não há uma estrutura sistematizada com os passos para serem seguidos no processo de materialização arquitetônica por meio da fabricação digital.

Então, no intuito de explorar a materialização arquitetônica a partir da fabricação digital, as RSLs investigaram o processo de fabricação digital na arquitetura, indicando uma complexidade no mapeamento desse processo projetual. As revisões revelaram uma larga variedade de critérios que os projetistas se apoiam nesse caminho para fabricação digital. Por vezes, esses critérios não estão descritos nos artigos, o que traz uma falta de clareza no processo decisório para a concepção das geometrias e objetos,

no qual não é claro quais foram as motivações para as decisões de projeto.

Durante a pesquisa, a RSL 2 teve três funções importantes: primeiro, confirmar a falta de estruturas taxonômicas para orientar o processo de fabricação digital, conforme observado na RSL 1. Em seguida, estabelecer o universo de estudo, selecionando as estruturas taxonômicas relevantes para a análise qualitativa de conteúdo, que validou a taxonomia utilizada. Por fim, embasar no desenvolvimento da taxonomia ao identificar critérios frequentes nos processos de arquitetura, conforme a Figura 68.

Figura 68 – Função da RSL2



Fonte: Autoria própria

3.1.1. Desenvolvimento das RSLs

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados de duas revisões sistemáticas da literatura (RSLs) que abordaram diferentes aspectos relacionados ao campo da arquitetura e fabricação digital. As RSLs foram conduzidas de forma sistemática, utilizando critérios de inclusão e exclusão, resultando em uma seleção de artigos que foram analisados. A partir dessas análises, foram identificadas as lacunas na pesquisa que serão discutidas neste item

A fim de desenvolver as RSLs, a literatura científica aborda que é necessário buscar protocolos para a análise. Cooper *et. al* (2019) em seu estudo propõem seis

etapas: definição do problema; coleta de evidências; avaliação da correspondência; análise e interpretação das evidências; e apresentação do método de síntese e resultados. Por outro lado, Smith *et al.* (2011) analisa que apenas são necessárias quatro etapas: fontes e busca; seleção de estudos; avaliação; apresentação dos resultados; e limitações. Morandi e Camargo (2015) abordam que a RSL pode ser conduzida em cinco etapas: definição da questão e metodologia; estratégia de busca; codificação; e por fim, síntese e apresentação dos resultados. Neste trabalho decidiu-se utilizar as etapas propostas por Tranfield *et. al*(2003), que define três etapas e com nove fases de pesquisa para determinar o protocolo da revisão para aplicar nas duas RSLs (Quadro 2).

Quadro 2 – Protocolo de análise das RSLs

Etapa 1 – Planejando a revisão

Fase 0 – Identificação da necessidade de uma revisão

Fase 1 – Preparação de uma proposta de revisão

Fase 2 – Desenvolvimento de um protocolo de revisão

Etapa 2 – Realizando uma revisão

Fase 3 – Identificação da pesquisa

Fase 4 – Seleção de estudos

Fase 5 – Avaliação da qualidade do estudo

Fase 6 – Extração de dados e monitoramento do progresso

Fase 7 – Síntese de dados

Estágio em relatórios e divulgação

Fase 8 – Relatório e recomendações

Fase 9 – Colocar as evidências em prática

Fonte: Tranfield *et. al*(2003) traduzido pela autora

Segundo Tranfield *et. al* (2003), na Etapa 1 / Fase 0 é necessário investigar nas

bases de dados os artigos relacionados ao objetivo. Desse modo, na RSL 1 buscou-se artigos que abordam as técnicas de fabricação digital de Iwamoto (2009): *sectioning* (seccionamento), *tessellation* (tesselação), *folding* (dobra), *contouring* (contorno) e *forming* (formação). Ao avançar para segunda revisão sistemática de literatura (RSL 2), identificou-se mais assuntos que poderiam auxiliar na busca, assim foram adicionados os termos: "*Kerf bending*", "*3D printing*" e "*digital fabrication*". Para restringir os resultados ao âmbito do processo projetual e estruturas taxonômicas, acrescentou os termos "*taxonomy*" e "*framework*". Os artigos utilizados nas RSLs, se restringiram aos exemplares revisados por pares, publicados em congressos na área de gráfica digital e que abarcam objetos que foram concebidos com o propósito de serem concretizados e aqueles que não puderam ser materializados (FELIPE; NOME, 2020).

As etapas enumeradas por Tranfield *et. al*/(2003) na Fase 1, determinou que a RSL 1 iria abranger os artigos presentes nas bases de dados da CumInCAD, Periódicos da Capes e *Science Direct* que disponibiliza o periódico *do 'Design Studies'*, no intervalo de anos de 2009 a 2020. Na RSL 2, ampliou-se a pesquisa para os periódicos *International Journal of Architectural Computing* (IJAC) e *Automation in Construction*. Nessa busca, acrescentou-se os artigos publicados entre 2009 e 2021. O Quadro 3 mostra os protocolos de revisão, palavras-chave e filtros aplicados para a Etapa 1 / Fase 2 para as duas RSLs.

Quadro 3 – RSL | Protocolo de revisão

RSL 1 Técnicas de fabricação digital
<ol style="list-style-type: none">1) Artigos de revisão e artigos de pesquisa (“<i>Review articles, Research articles</i>”);2) Idioma: português, inglês e espanhol;3) Bases de dados: <i>Science Direct</i> (Periódico: <i>design studies</i>), CumInCAD e Periódicos da Capes;4) Os termos foram restritos ao campo: “Título, resumo e palavras-chave” dependendo da nacionalidade da base de dados:<ul style="list-style-type: none">- Planos seriados / planos em série / seccionamento / <i>Sectioning</i>,- Tesselação / <i>Tessellation</i> / <i>panelling</i>- Dobra / <i>Folding</i>;- Contorno / <i>Contouring</i>;- Formação / <i>Forming</i>.5) Para restringir ao tema dessa tese, adicionou-se aos termos acima os seguintes complementos:<ul style="list-style-type: none">- <i>Arquitectura</i> / arquitetura / <i>Architecture</i>- Design paramétrico / <i>Parametric design</i>- Fabricação digital / <i>Digital fabrication</i>6) Artigos publicados no intervalo entre os anos de 2009-2020.
RSL 2 Técnicas de fabricação digital e taxonomias
<ol style="list-style-type: none">1) Artigos que abordam “<i>Kerf bending</i>”, “<i>3d printing</i>”, “<i>digital fabrication</i>” “<i>taxonomia</i>” e “<i>framework</i>” sobre o processo de fabricação digital;2) Foram adicionados os artigos publicados nos periódicos da <i>International Journal of Architectural Computing</i> (IJAC) e <i>Automation in Construction</i>;3) Artigos publicados no intervalo entre os anos de 2009-2021.

Fonte: Autoria própria

Na segunda etapa abordada por Tranfield *et. al* (2003), selecionou-se os artigos que abordavam os termos definidos no protocolo de revisão e excluiu os exemplares que não tratam da temática de arquitetura (fase 3 e fase 4). Posteriormente, nas fases seguintes também foram retirados, os artigos duplicados e que não se relacionavam com

a fabricação digital na arquitetura, bem como aqueles relacionados com os campos da engenharia mecânica, ciência dos materiais, arquitetura naval ou medicina (fases 5, 6 e 7). A etapa seguinte, sintetizou-se os dados e analisou-se os resultados; também foram identificados a metodologia empregada em cada artigo, as técnicas de fabricação digital utilizadas e os processos de análise dos resultados apresentados.

A RSL 1 apresenta os resultados das buscas de dados do *Science Direct*, CumInCAD e Periódicos da Capes e a partir das palavras chaves: “*sectioning*”, “*tessellation*”, “*folding*”, “*contouring*” e “*forming*”. Nessa investigação, encontrou-se um quantitativo por tema nos campos de título, resumo e palavras-chave em um determinado conjunto de artigos. O tema “*forming*” foi o que apresentou maior contagem com 36.016 ocorrências, enquanto que “*tessellation*” foi o tema com menor número, apenas 416. Outros temas apresentados foram “*sectioning*” com 9.076 ocorrências, “*folding*”, com 9.883 ocorrências, e “*contouring*”, com 2.182 ocorrências. Esses dados são úteis para compreender a frequência de utilização de cada tema nos campos de título, resumo e palavras-chave e abordagem deles na RSL.

Após realizar uma pesquisa inicial que retornou um alto volume de resultados (57.243 artigos), decidiu-se refinar a busca para obter resultados mais relevantes. Adicionaram-se as palavras “*architecture*”, “*parametric design*” e “*digital fabrication*” e os marcadores “*AND*” e “*OR*” na busca nas bases de dados. Utilizou-se a seguinte busca específica: “(*sectioning*) *AND* (*architecture*) *AND* (*digital fabrication*) *AND* (*parametric design*)” no campo artigos com esses termos e o termo “*architecture*” no campo título, resumo e palavras-chave.

Os resultados da pesquisa incluem 291 artigos que estão em conformidade com o protocolo de revisão e foram classificados de acordo com as técnicas de fabricação digital. A categoria “Formação” teve o maior número de resultados com cento e dezoito

artigos, seguida pela categoria "Dobra" (*Folding*), com noventa e um artigos, "Tesselação" (*Tessellation*), com vinte e quatro artigos, "Seccionamento" (*Sectioning*), com quarenta e cinco artigos e "Contorno" (*Contouring*), com apenas treze artigos. Durante a busca, eliminou-se os artigos duplicados e aqueles que não estavam relacionados à área de arquitetura. Assim, os artigos que totalizaram 225 artigos, nos quais apenas 86 abordavam as técnicas de fabricação digital relacionadas à arquitetura, projeto paramétrico e fabricação digital. Desses artigos, apenas 58 exemplares apresentavam experimentos e abordagens diretas, enquanto os outros vinte e oito itens exploravam temas de revisão de literatura, histórico da fabricação digital e experimentações teóricas em assuntos diversos.

Durante a pesquisa, a RSL 2 ampliou a busca realizada anteriormente adicionando os periódicos *International Journal of Architectural Computing* (IJAC) e *Automation in Construction*. Foram encontrados 112 artigos publicados entre 2009 e 2021 que tratam de estruturas taxonômicas aplicáveis à arquitetura. Depois de examinar os resumos dos artigos, a quantidade foi reduzida para os 32 itens que compõem a RSL 2 e validam a ferramenta proposta nesta tese. Esses artigos foram analisados com base nos critérios encontrados, buscando traçar a relação entre os critérios por meio de categorias e critérios. Isso ajudou a compreender o processo de projeto para fabricação digital e a desenvolver a Taxonomia para Fabricação Digital. A etapa foi realizada seguindo a metodologia de Krippendorff (2004) para análise qualitativa de conteúdo, conforme descrito no item 3.4 da tese.

3.1.2. Resultados das RSLs

Este item apresenta síntese das análises realizadas em duas Revisões Sistemáticas da Literatura (RSLs) sobre temas relevantes no campo da arquitetura e da fabricação digital. Discute-se como foi feita a análise e como essas RSLs contribuíram para a criação da taxonomia, objetivo principal deste trabalho.

As revisões sistemáticas de literatura foram fundamentais para estabelecer os critérios da taxonomia. A análise das RSLs permitiu destacar os temas e assuntos mais frequentes relacionados à materialização arquitetônica com a fabricação digital. Esses aspectos foram então transformados em critérios e incorporados à "Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura", resultado direto da ferramenta desenvolvida nesta pesquisa.

A análise dos artigos revelou que os protótipos provenientes da fabricação digital são frequentemente utilizados de forma comparativa. Os estudos são baseados em projetos de objetos arquitetônicos para testar uma forma, material ou geometria específica. Entretanto, apesar dos artigos terem uma natureza descritiva, não fica claro como foi realizada a comparação ou o processo até a forma final. Neles, o processo projetual não é documentado e as etapas são guiadas pelas experiências prévias do projetista, as condições do mercado local e os conhecimentos adquiridos ao longo da jornada profissional (FELIPE; NOME, 2020).

Os artigos possuem semelhanças entre os métodos, processo de materialização e desenvolvimento da geometria. Utilizam-se das técnicas de fabricação digital de forma isolada ou até combinando várias para uma mesma peça. Nesse sentido, há protótipos concebidos a partir das formas para fabricação digital que incluem técnicas como conformação (*forming*) para estruturas inspiradas na bioarquitetura com o uso de robôs,

dobra (*folding*) como dobradura ou origami, e a busca por padrões de tesselação inovadores. Esses novos padrões auxiliam no desenvolvimento de modos para materializar, a partir do maquinário, como: corte à laser ou com fresadoras para placas e encaixes produzidos em impressora 3D.

Os artigos analisados nesta pesquisa apresentam metodologias que podem ser classificadas como indutivas ou dedutivas. A abordagem indutiva começa com observações específicas para chegar a uma conclusão geral, enquanto a dedutiva parte de uma teoria ou hipótese geral e trabalha em direção a conclusões específicas ou previsões por meio de experimentos. Nessas duas abordagens, testam-se as hipóteses em protótipos, modelos digitais ou maquetes físicas em escala reduzida, a fim de entender a geometria proposta. Além disso, os modelos digitais são utilizados com simulações computacionais para desenvolver estratégias de forma (FELIPE; NOME, 2020). Nesse sentido, alguns exemplares também empregaram a modelagem paramétrica para gerar formas e simulações computacionais para avaliar desempenho ambiental e estrutural. Essas aplicações são relevantes para enriquecer as discussões sobre fabricação digital e auxiliar na escolha da geometria da superfície do objeto planejado; o que gera impacto nas decisões sobre o material, maquinário e na forma para fabricação digital utilizada.

Na análise dos métodos de condução das pesquisas, destaca-se a aplicação de estudos de caso como um modo de comparar as variações entre modelos produzidos. Não foi encontrado estudos que abordam diferentes processos projetuais para o mesmo objeto, ou ainda uma pesquisa que realizou diversos experimentos para chegar à forma final. Assim, o processo projetual ainda é inconclusivo e não evidencia os progressos obtidos a partir da proposta inicial.

Os resultados da pesquisa também abordam a questão da escala dos objetos,

apresentando estudos de caso que utilizam protótipos, modelos digitais ou elementos em tamanho real. As pesquisas investigam modelos fabricados em diversos materiais, como concreto, alvenaria, papel e madeira, de maneira empírica. Nesse contexto, destaca-se a madeira como um dos materiais mais comuns em experimentações com técnicas de fabricação digital, devido à sua facilidade de deformação, baixo custo e disponibilidade para os projetistas envolvidos. Por outro lado, materiais, como alvenaria e concreto, são usados de forma experimental em um ambiente controlado, como um laboratório ou indústria, devido à sua complexidade e requisitos estruturais. Esses relatos são menos comuns e geralmente envolvem o uso de maquinários específicos. Portanto, as experimentações com materiais como madeira ou papel são mais frequentes e representam a maioria das experiências com técnicas de fabricação digital.

Ainda na análise dos artigos, é destacada a importância das simulações computacionais no desenvolvimento de estudos de caso. Nesses estudos, modelos digitais ou protótipos são submetidos a condições específicas para testar seu desempenho ambiental (como ventilação, iluminação e acústica) e seu desempenho estrutural (incluindo flexibilidade, torção e deformação). As simulações permitem analisar e comparar os estudos de caso, considerando variações nos resultados de acordo com critérios como a espessura e características técnicas do material utilizado, assim como mudanças nas condições climáticas e na forma arquitetônica proposta.

As análises das RSLs revelaram que subjetivamente os projetistas seguem um caminho com etapas específicas (critérios) durante o processo de criação de projetos. Esses critérios são repetidos em vários projetos e foram identificados durante a análise. Percebeu-se que algumas decisões não foram explícitas para não diminuir a relevância dos projetos ou para não registrar os percalços do caminho. Ao comparar o relacionamento entre os projetos com outros de características semelhantes, foi possível

identificar como é possível evitar erros e reduzir o retrabalho no processo de materialização arquitetônica.

A análise permitiu abordar diversos tópicos relacionados à fabricação digital, incluindo a história e desenvolvimento até os métodos, técnicas e aplicações. Além disso, deve-se avaliar o impacto dessa tecnologia em diversas indústrias e campos de atuação. Identificou-se também os desafios e limitações da fabricação digital, o que formulou uma visão ampla do estado atual dessa tecnologia, bem como de sua direção futura e potencial impacto em campos correlatos.

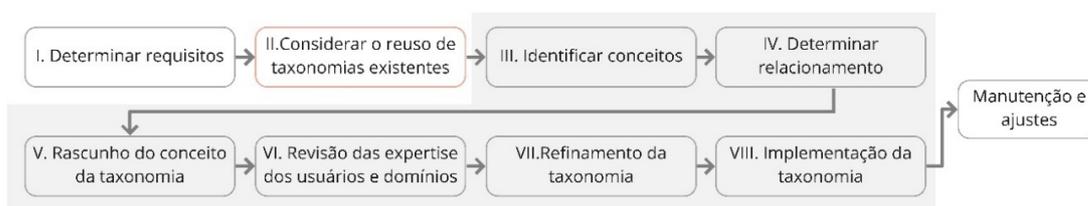
3.2. Estruturação da taxonomia

Esse tópico inicia a fase de “proposição” da abordagem metodológica, discutindo a etapa C (item 1.2) e compreendendo o objetivo específico III do trabalho. Assim, há o desenvolvimento da estruturação e sistematização da taxonomia, a partir das etapas propostas por Whittaker e Breininger (2008) e Fraunhofer ISST (2009).

A discussão desse item teve como foco desenvolver uma taxonomia para preencher a lacuna identificada nas revisões sistemáticas de literatura (RSLs), que consistiu na falta de uma estrutura taxonômica que aborde critérios inerentes ao processo projetual utilizando a fabricação digital. A RSL indicou que os artigos abordam o processo projetual de forma macro, com critérios relacionados às etapas de programação arquitetônica, concepção e execução. Há artigos também que discutem estratégias para materiais, processos de fabricação, custos, simulação computacional e tempo de maquinário. Com base nas taxonomias encontradas na literatura científica, desenvolveu-se uma nova estrutura a partir das etapas ilustradas na Figura 69:

Figura 69 – Desenvolvimento de taxonomia

Nota: imagem com tradução nossa



Fonte: Adaptado de Fraunhofer ISST (2009)

Fraunhofer ISST (2009) propõe nove etapas para o desenvolvimento, refinamento, implementação e manutenção da taxonomia. Essas etapas podem ser usadas de forma interativa ou sem uma ordem específica, elas são: determinar o processo de desenvolvimento de requisitos, considerar a reutilização de taxonomias existentes, identificar conceitos, determinar relacionamentos, rascunhar o conceito da taxonomia, revisar com usuários e especialistas em domínio, refinar a taxonomia, implementar a taxonomia e gerenciar e manter. As etapas são apresentadas de forma linear, mas podem ser adaptadas conforme a necessidade e o contexto (Quadro 4).

Quadro 4 – Etapas de Fraunhofer ISST (2009)

	<i>Etapas</i>	<i>Tradução</i>
<i>I</i>	<i>Determine requirements development process</i>	Determinar o processo de desenvolvimento de requisitos
<i>II</i>	<i>Consider reuse of existing taxonomies</i>	Considere a reutilização de taxonomias existentes
<i>III</i>	<i>Identify concepts</i>	Identificar conceitos
<i>IV</i>	<i>Determine relationships</i>	Determinar relacionamentos
<i>V</i>	<i>Draft taxonomy concept</i>	Rascunho do conceito da taxonomia
<i>VI</i>	<i>Review with users and domain experts</i>	Revise com usuários e especialistas em domínio
<i>VII</i>	<i>Refine taxonomy</i>	Refinar a taxonomia
<i>VIII</i>	<i>Implement taxonomy</i>	Implementar taxonomia
<i>IX</i>	<i>Manage and maintain</i>	Gerenciar e manter

Fonte: Fraunhofer ISST (2009)

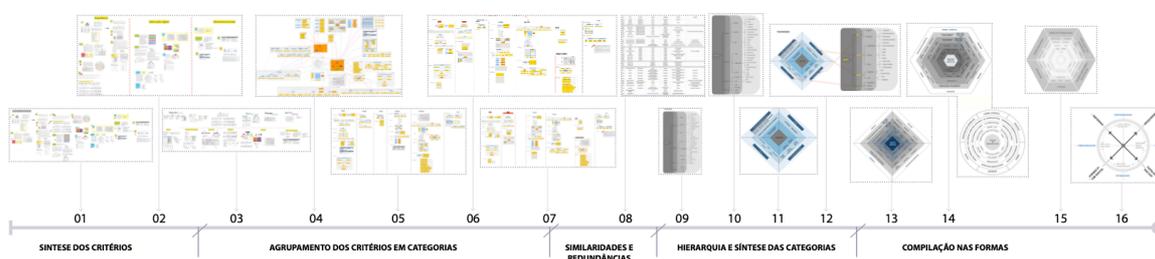
Na **etapa I** foram estabelecidos os requisitos para a construção da taxonomia, que serviu de base para as etapas subsequentes: II, III e IV. Na **etapa II** destaca a possibilidade de reutilização de taxonomias existentes que atendam ao objetivo proposto, precedido por um refinamento, estudo de implementação, gerenciamento e validação da taxonomia.

Durante a **etapa III** processo, foram identificadas aproximadamente vinte taxonomias diferentes que abordam o processo de projeto em arquitetura. As estruturas identificadas incluem (ou não necessariamente) a fabricação digital em suas etapas, além de abordarem a escolha de materiais e as etapas projetuais. As taxonomias disponíveis na literatura científica foram avaliadas e organizadas em diversas geometrias, que foram testadas e readequadas por meio da seleção e exclusão de critérios duplicados ou subjetivos.

Ao todo, a construção da ferramenta passou por 16 fases, que envolveram a síntese dos critérios, o agrupamento dos critérios em categorias, a verificação de

similaridades e redundâncias, a síntese das taxonomias com as hierarquias e por fim, a compilação nas formas. O resultado foi o desenvolvimento de uma taxonomia abrangente que pode auxiliar projetistas no processo de projeto utilizando a fabricação digital e auxiliar na catalogação de projetos provenientes da fabricação digital, conforme a Figura 70.

Figura 70 – Visão geral do desenvolvimento da taxonomia



Fonte: Autoria própria

[acesso](#)



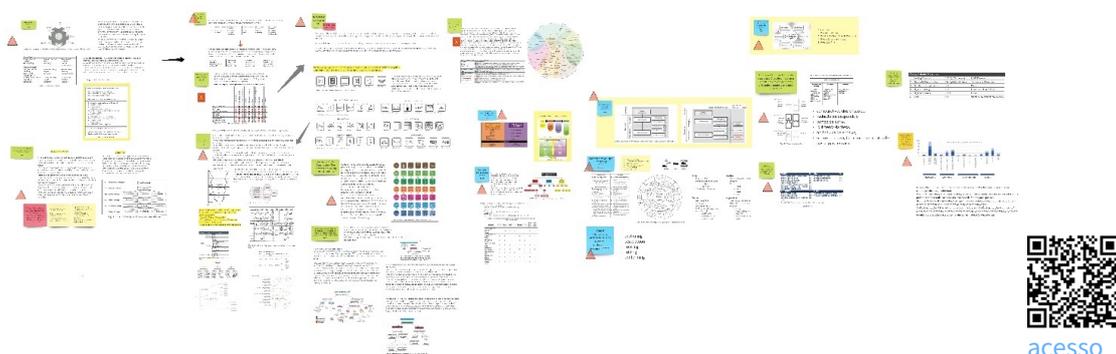
As **etapas IV, V e VI** da pesquisa foram executadas simultaneamente e consistiram em estabelecer relações e esboçar a taxonomia. O objetivo dessas etapas foi sintetizar os critérios em uma taxonomia clara e compreensível. Para tanto, à medida que as taxonomias foram sendo elaboradas, foram feitas perguntas retóricas sobre sua eficácia e possíveis aplicações práticas de como o projetista poderia usar. Por fim, as etapas **VII, VIII e IX** iniciam e compõem o processo de validação da ferramenta, descritas no item 1.3 e realizadas ao longo do capítulo 4.

O desenvolvimento da ferramenta e a construção da taxonomia percorreram um total de 16 fases até sua forma final. A primeira fase consiste na síntese das taxonomias existentes em agrupamento por temas (imagem 1 e 2); após isso tentou agrupar os

critérios, presentes nas taxonomias anteriores, nas categorias mais recorrentes nas imagens de 3 a 7. Entre as imagens 8 e 9 tentou-se aferir as similaridades e redundâncias desses critérios separados em grupos, buscando um modo de simplificar os critérios escolhidos. Na fase seguinte, sintetizou e hierarquizou os critérios, separando-os em categorias gerais e critérios nas imagens de 10 a 12. Ao definir isso, desenvolveu-se qual seria o melhor modo de comunicar em uma estrutura gráfica. Então, a partir de possíveis aplicações em projetos concluídos e no processo de projeto de modelos que estava sendo desenvolvidos, buscou-se um modo de comunicar os critérios para os projetistas em formas geométricas como quadriláteros, hexágonos e círculos. Esse processo percorreu entre as fases 12 a 16.

Durante o processo de construção da Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura, a primeira fase nº 01 envolveu a identificação e separação das taxonomias em taxonomias. Para isso, utilizou-se a simbologia de quadrado na cor verde, triângulo na cor vermelha ou quadrado na cor azul para separá-las. Foram identificadas as taxonomias que tinham o mesmo tema e descartadas as que não contribuiriam para projetos de arquitetura com fabricação digital (conforme apresentado na Figura 71).

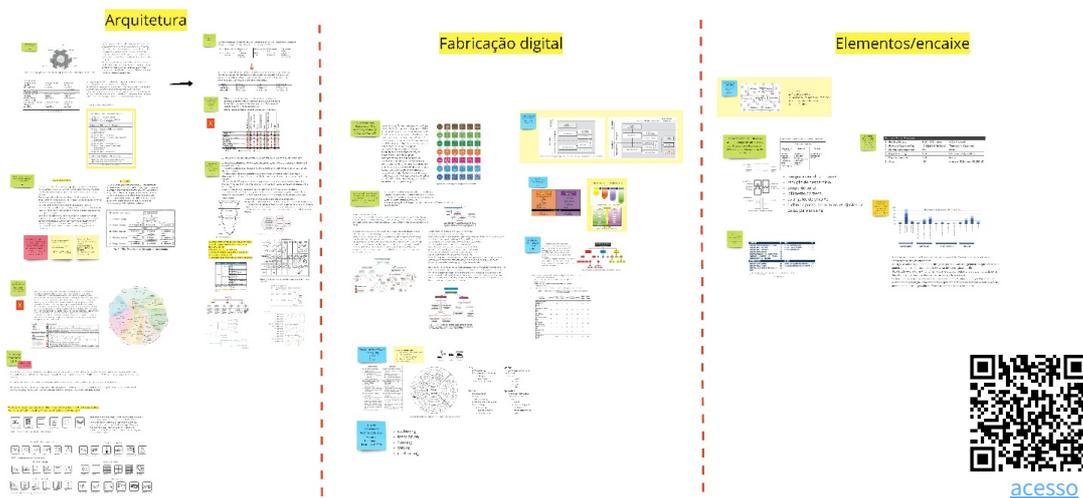
Figura 71 – N.º 01 | Síntese dos critérios



Fonte: Autoria própria

Na fase N.º 02, ocorreu o agrupamento das taxonomias identificadas na fase anterior em três grandes temas principais: arquitetura, fabricação digital e elementos de encaixe. Essa categorização é realizada com o objetivo de organizar as informações coletadas e simplificar a compreensão da ferramenta pelos usuários. Nessa fase, tentava-se associar cada taxonomia em apenas uma categoria, mas percebe-se que as taxonomias podem ser associadas a um ou mais temas, de acordo com seu conteúdo e sua finalidade (Figura 72).

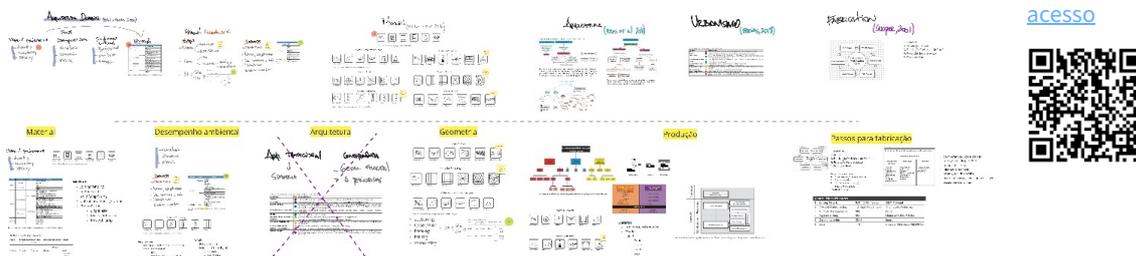
Figura 72 – N.º 02 | Síntese em três temas



Fonte: Autoria própria

A partir das taxonomias agrupadas na fase anterior, na imagem n.º 3 foi identificada a necessidade de subdividir as taxonomias em mais temas para abranger todas as variáveis presentes. Assim, percebeu-se que os temas mais recorrentes entre todos os critérios que as taxonomias poderiam abranger quatro grandes temas: arquitetura, urbanismo, fabricação e material. Dentro de cada um dos temas, criou-se subcategorias: desempenho, geometria, produção e passos de fabricação (Figura 73)

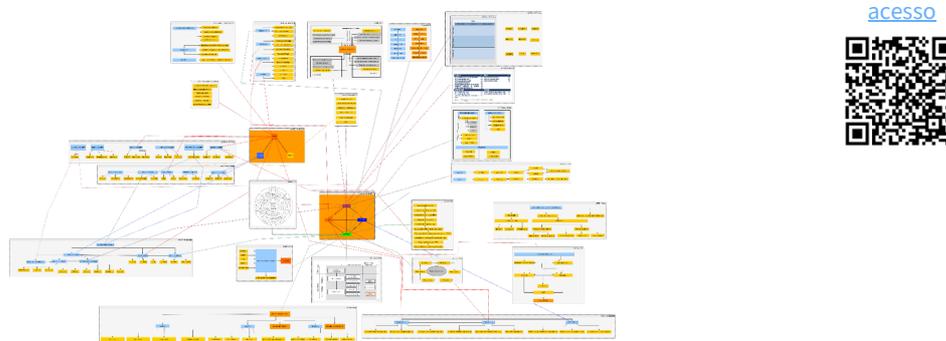
Figura 73 – N.º 03 | Síntese em vários temas



Fonte: Autoria própria

Ao agrupá-las em temas e subcategorias, entendeu-se que algumas das taxonomias estudadas eram mais abrangentes do que outras. Não sendo uma divisão equilibrada e com critérios que respondesse apenas a aquela categoria que estava enquadrada. Ao agrupar as taxonomias em sua totalidade não teve um resultado satisfatório. Portanto, decidiu-se retirar os critérios de cada categorias e entender quais eram mais recorrentes entre eles. Desse modo, agrupou-se os critérios que estavam presentes em todas as taxonomias em categorias: forma, função e tempo de Bax e Trum (2000) e os critérios de Agudelo *et. al* (2017) - material, forma, função e processo. Esse agrupamento foi apresentado na Figura 74.

Figura 74 – N.º 04 | Agrupamento por semelhança entre os critérios

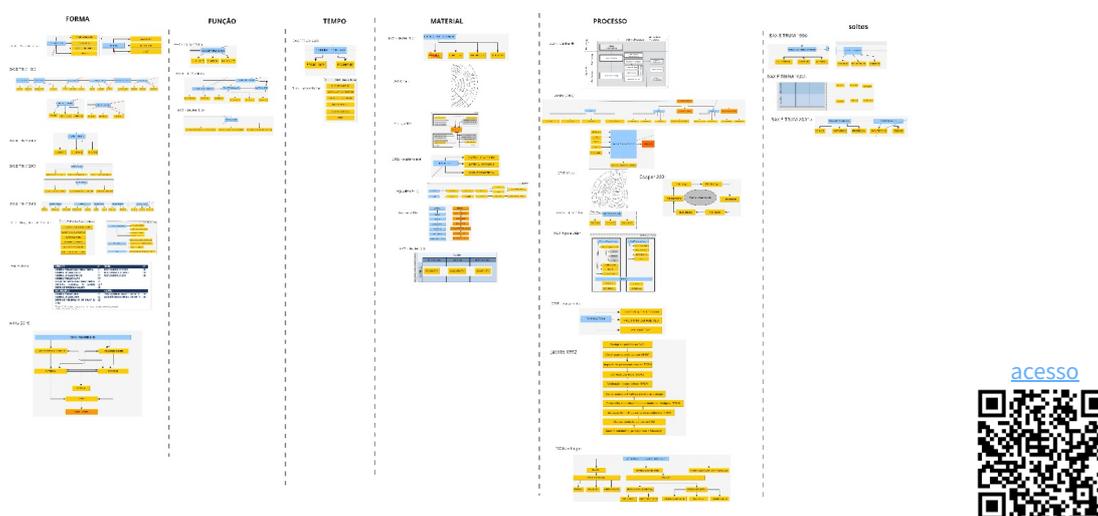


Fonte: Autoria própria

Em seguida, os critérios foram organizados em paralelo, levando em consideração sua origem nas respectivas taxonomias, a fim de facilitar o agrupamento em categorias. As categorias mais frequentes foram a forma, função, tempo, material e processo, resultantes da combinação da fase anterior.

Observou-se que a categoria "forma" é recorrente em diversos autores com nomenclaturas distintas, como "*design*" em Austern et. al (2018), "*shape*" e "*construction*" de Bax e Trum (2000, 2002; 1996) e Ashby (2019), "*spacial concept*" e "*Architectural Concept*" Bax e Trum (2000); "geometria" em Griz, Queiroz e Nome (2017). O tema de "materiais" é abordado por diversos autores, como Bax e Trum (2002), Chua (2003), Austern et. al (2018), Ashby (2013), Agudelo (2017) e Vrouwe (2018). A categoria de função é explicitada por Bax e Trum (2000, 2002) e Agudelo (2017). Em "processo" é abordado o procedimento da fabricação por vários autores, como Celani e Pupo (2009) e Gebhardt (2011-), Bax e Trum (2002), Chua (2003) e o método de manufatura; Ashby (2019) e Pupo (2008) explicitam os tipos de fabricação; Austern et. al (2018) aponta os componentes aplicáveis as máquinas para a fabricação. Por fim, a Jacobs (1992) e Cooper (2001) cita as etapas projetuais para o processo de fabricação. O tema do "tempo" no qual Bax e Trum (2000) e Sass e Botha (2006) explicitam em suas taxonomias. Nesse arranjo, as categorias propostas de forma, função, tempo, material, processo e os critérios que não tiveram uma relação com nenhuma categoria foram denominados de "soltos" (Figura 75).

Figura 75 – N.º 05 | Distribuição em temas



Fonte: Autoria própria

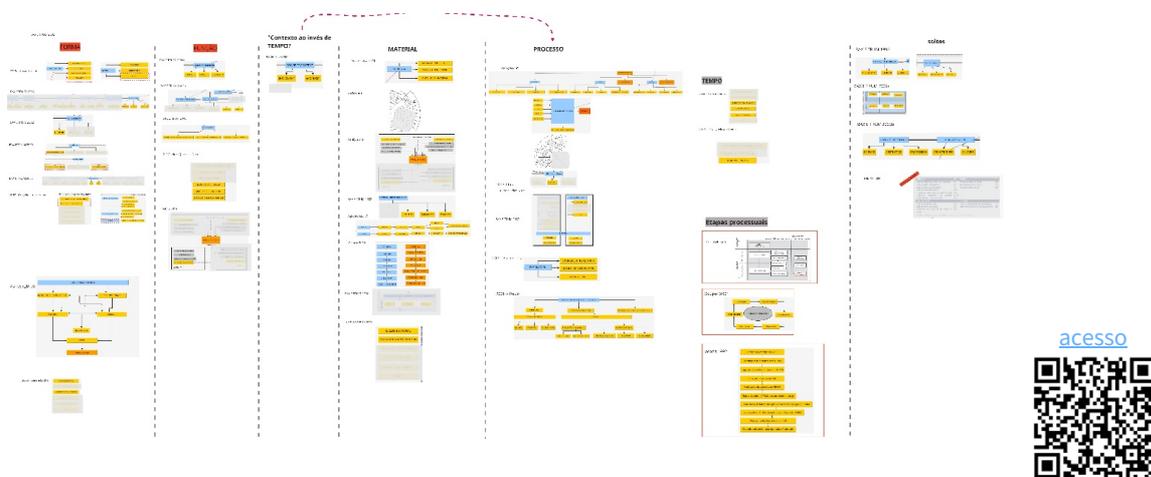
Na imagem 06, ainda no processo de compilação dos agrupamentos das taxonomias. Entendeu-se que a categoria “tempo” poderia ser uma subdivisão de “processo” e, esta poderia ter outra subdivisão denominada “etapas processuais”.

Na categoria “forma” foram agregadas as variáveis que abordam o projeto, forma ou design do elemento. No caso da taxonomia, esse conceito deverá abarcar os critérios como geometria, estrutura, escala, custo e critérios de sustentabilidade para uniões. Por outro lado em “materiais”, são abordados assuntos relacionados que auxiliam na eficácia, nas propriedades dos materiais como a quantidade, orientação, acabamento, forma de conexão e tipos de materiais.

Na categoria “função”, entende-se os critérios que auxiliam na geometria, tais quais: estabilidade, manutenibilidade, usabilidade, físico e econômico. Em processo, as variáveis influenciam diretamente no tempo e nas etapas projetuais. O tema do “tempo” impacta na duração do processo, na montagem que influencia na quantidade de energia gasta; seja do maquinário ou na mão de obra. As “etapas projetuais” se repetiram em

diversas taxonomias com critérios que falam sobre como o deve ser feito o manuseio do maquinário, os tipos de fabricação digital e as etapas de cada fase. Esta estruturação abrange o processo de materialização arquitetônica na fase macro, na qual contém as variáveis que influenciam as etapas de programação arquitetônica, produção de projeto e execução (Figura 76).

Figura 76 – N.º 06 | Distribuição em outros temas



Fonte: Autoria própria

Seguindo, na imagem n.º 07 entendeu-se que há categorias no qual vários critérios se relacionam e subtemas que eles podem ser vinculados. Havendo a necessidade de separar os critérios de forma hierárquica. Assim, foram postos os critérios em categorias gerais na primeira linha, e na segunda e terceira linha os temas vinculados ao tema principal. Desse modo, a taxonomia foi sintetizada em quatro temas: forma, função, materiais e processo, apresentados paralelamente. Ressalta-se que em “processo” há os dois subtemas: etapas processuais e tempo (Figura 77).

Figura 78 – N.º 08 | Checagem de similaridades e redundâncias

ano	Autor	subcat3	grupo	categoria	subcat1	subcat2
2018	Austern	LOGÍSTICA	forma	construção	transporte	
2018	Austern	LOGÍSTICA	forma	Design		
2019	ASHBY	LOGÍSTICA	forma	design	Custo	
2000	Bax e Trum	LOGÍSTICA	forma	planejamento		
1994	Bax e Trum	FABRICABILIDADE	forma	Design		
2000	Bax e Trum	FABRICABILIDADE	forma	design	fabricabilidade	
2018	Austern	FABRICABILIDADE	forma	construção	montagem (facilidade)	
2017	Griz queiroz nome	FABRICABILIDADE	forma	design	encaixes	larga da zona destinada aos encaixes
2018	Austern	FABRICABILIDADE	forma	construção	Detalhe	
2002	Bax e Trum	FABRICABILIDADE	forma	elemento (escala do)	ESCALA	
2008	Pupo e Celani		PRODUÇÃO AUTOMATIZADA	NUMERO DE DIMENSÕES		
2018	Austern	FABRICABILIDADE	forma	construção	Tolerâncias	
2017	Griz queiroz nome	FABRICABILIDADE	forma	design	TEMPO	tempo de corte
2017	Griz queiroz nome	FABRICABILIDADE	forma	design	tipos de encaixe	tipos de encaixe
2018	Griz queiroz nome	FABRICABILIDADE	forma	design	eixo do passo e ajustes	eixo do passo e ajustes
2018	AUSTER		PROCESSO DE MANUFATURAMENTO	FABRICAÇÃO DIGITAL	COMPONENTE DE REPETIÇÃO	COMPONENTE DE REPETIÇÃO
2019	ASHBY	FORMA	forma	Design	forma exigida	
2018	Austern	FORMA	forma	Design	geometria	
2017	Griz queiroz nome	FORMA	forma	Design	geometria dos porticos	altura do ambiente
2018	Austern	FORMA	forma	Design	estrutura	
2019	ASHBY	FORMA	forma	Design	perfil e propriedades obrigatório	
2008	Sass e botha	FORMA	forma	Design	material de construção	
1990	Bax e Trum	FORMA	forma	Design	estabilidade	
2000	Bax e Trum	FORMA	forma	Design	forma	
1990	Bax e Trum	FORMA	forma	Design	usabilidade	
2018	Austern et al		MATERIAL	MATERIAL	PROPRIEDADES	
2018	Austern et al		MATERIAL	MATERIAL	DIMENSÃO	
2018	Austern et al		MATERIAL	MATERIAL	QUANTIDADE	
2017	Griz queiroz nome	PROCESSO	forma	design	Resíduos	
2019	ASHBY	PROCESSO	PROCESSO DE MANUFATURAMENTO	DINHEIRO	RESIDUO DE MATERIAIS E ENERGIA	PRODUTO
2019	ASHBY	PROCESSO	PROCESSO DE MANUFATURAMENTO	ENERGIA	RESIDUO DE MATERIAIS E ENERGIA	PRODUTO
2019	ASHBY	PROCESSO	PROCESSO DE MANUFATURAMENTO	MATERIAL	RESIDUO DE MATERIAIS E ENERGIA	PRODUTO
2019	ASHBY	PROCESSO	PROCESSO DE MANUFATURAMENTO	TEMPO	RESIDUO DE MATERIAIS E ENERGIA	PRODUTO
2008	SASS E BOTHA	PROCESSO	TEMPO	TEMPO	TEMPO	NUMEROS DE COMPONENTES
2008	Sass e botha	FABRICABILIDADE	forma	design	Número de componentes	número de componentes
2008	SASS E BOTHA	PROCESSO	TEMPO	TEMPO	TEMPO	DIAS DE CORTE
2008	SASS E BOTHA	PROCESSO	TEMPO	TEMPO	TEMPO	QUANTIDADE DE DIAS PARA MONTAGEM
2018	AUSTER	PROCESSO	PROCESSO DE MANUFATURAMENTO	FABRICAÇÃO DIGITAL	TEMPO	TEMPO DE MÁQUINA
2017	GRIZ QUEIROZ E NOME		TEMPO	TEMPO	TEMPO DE CORTE	
2014	GEBHARDT		ETAPAS PROGRESSIVAS	PROGRESSOS ADITIVOS	MANUFATURA ADITIVA	

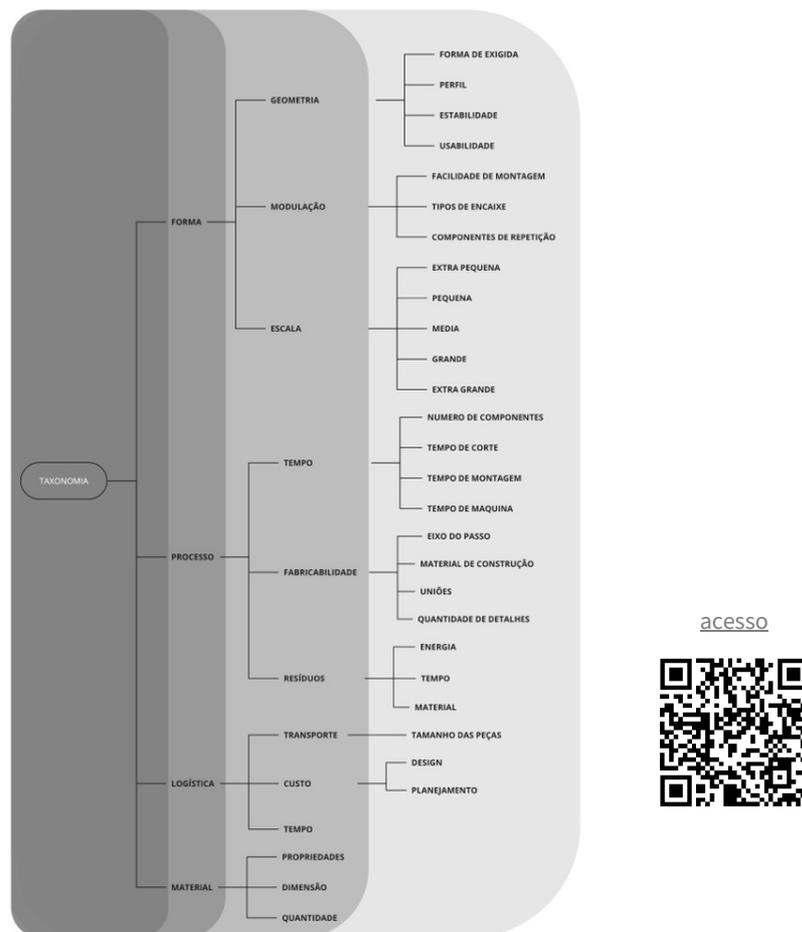
Fonte: Autoria própria

Na Figura 09, foi identificada a necessidade de representar a taxonomia de forma visual para facilitar a compreensão das relações e hierarquias entre os critérios. Com isso em mente, foram selecionados critérios objetivos, que podem ser aplicados em projetos de fabricação digital, enquanto critérios subjetivos foram excluídos por sua dificuldade de mensuração pelo projetista. Os critérios foram então organizados em quatro categorias principais: forma, processo, logística e material, com o objetivo de simplificar as variáveis envolvidas.

A categoria "forma" abrange critérios relacionados ao projeto, design e geometria do elemento, incluindo aspectos como estrutura, escala, custo e sustentabilidade. Na categoria "materiais", os critérios envolvem a eficácia, propriedades, quantidade, orientação, acabamento, forma de conexão e tipos de materiais. A categoria "função"

engloba critérios relacionados à estabilidade, manutenibilidade, usabilidade e aspectos físicos e econômicos. A categoria "processo" inclui variáveis que influenciam diretamente o tempo e as etapas do projeto, sendo dividida em "etapas processuais" e "tempo". Na categoria "tempo", são considerados a duração do processo, a montagem e a quantidade de energia consumida. Já na categoria "etapas processuais", são abordados o manuseio de máquinas, os tipos de fabricação digital e as etapas de cada fase. A Figura 79 representa visualmente esses critérios, destacados em tons de cinza e divididos em dois níveis distintos.

Figura 79 – N.º 09 | Critérios em hierarquia



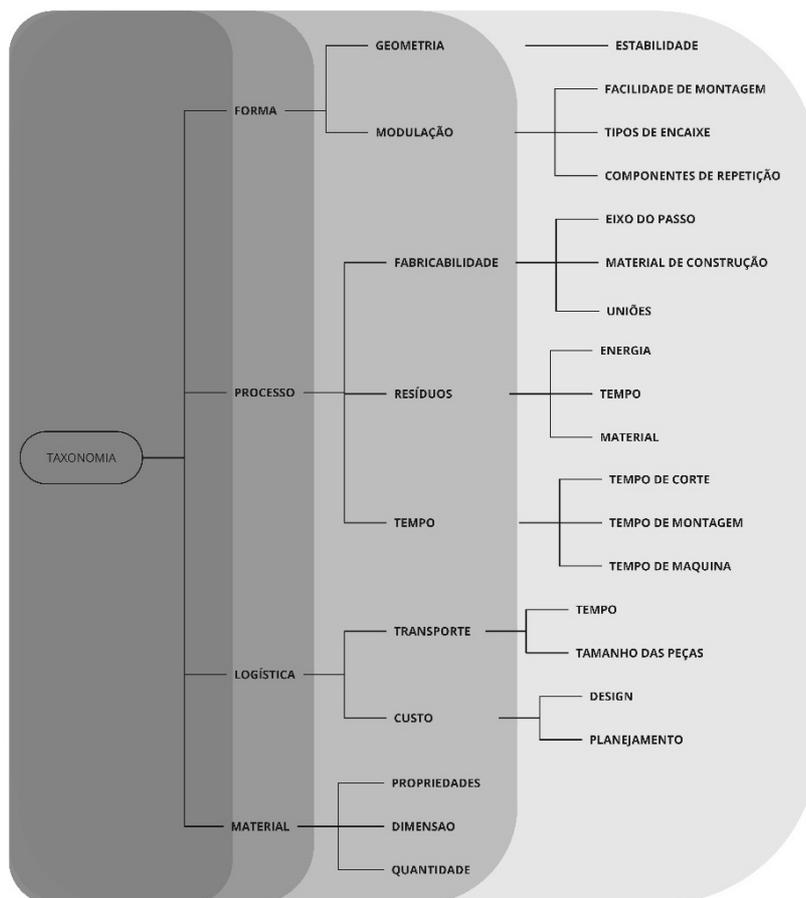
[acesso](#)



Fonte: Autoria própria

Na fase seguinte, n.º 10, percebe-se que a organização dos critérios em hierarquia é uma estratégia útil, mas nota-se que o critério "escala" é algo definido previamente à aplicação da taxonomia. Isso ocorre porque o projetista define as dimensões do objeto arquitetônico antes de aplicar os critérios encontrados na literatura científica. Dessa forma, ao dispor os critérios em hierarquia, percebeu-se que algumas categorias devem ser escolhidas pelos projetistas antes de se chegar a essa disposição. Assim, a subdivisão "escala", que fazia parte da categoria "forma", foi reorganizada em outro gráfico, como representado na Figura 80, que não inclui mais a categoria "escala".

Figura 80 – N.º 10 | Síntese dos temas em hierarquias

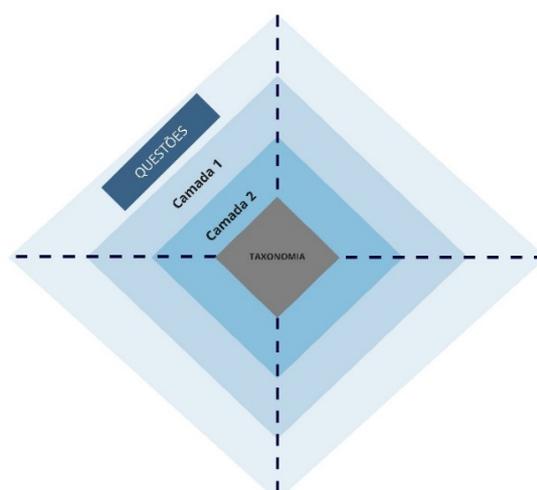


Fonte: Autoria própria

No entanto, ao dispor os critérios em uma forma hierárquica, percebeu-se que não haveria flexibilidade nas decisões. Esse tipo de disposição induz o projetista a escolher um caminho para percorrer. Dificultando a troca entre as categorias ou ainda mudar o caminho entre os níveis, pelos critérios. Uma vez que, as categorias e critérios não possuíam uma conexão entre eles. Dessa maneira, as escolhas dos projetistas seriam limitadas a primeira decisão tomada e não abrangeria todos os critérios possíveis e relacionados a fabricação digital.

Dessa forma, com o objetivo de abranger uma ampla gama de critérios e permitir que o projetista pudesse acessá-los facilmente, decidiu-se dispor os critérios em uma forma geométrica (Figura 81). Considerando que os critérios foram sintetizados em quatro categorias, optou-se por um losango que foi subdividido em losangos menores para acomodar os critérios. O losango foi então dividido em quatro quadrantes, com as categorias gerais da forma arquitetônica colocadas na parte externa em azul mais escuro e os critérios dispostos nos losangos menores.

Figura 81 – Losango com critérios



Fonte: Autoria própria

A disposição em níveis buscou evidenciar as hierarquias entre as categorias e os critérios, de forma a facilitar a compreensão e organização dos critérios. Essa geometria foi escolhida para permitir que o projetista pudesse percorrer todos os critérios de modo horário ou anti-horário. Essa forma possibilitou uma organização hierárquica dos critérios, permitindo uma visualização mais clara das relações entre eles. Inicialmente, foram identificadas quatro categorias gerais: aspectos projetuais, técnicas de fabricação digital, topologia das curvas e materiais utilizados.

Entretanto, percebeu-se a necessidade de adicionar outras três categorias: escala, uniões e técnica de fabricação digital. Com isso, os projetistas teriam acesso a um conjunto completo de critérios para definir a forma arquitetônica, de forma abrangente e integrada. O Quadro 5 apresenta todas as categorias e suas subcategorias, permitindo uma compreensão mais clara e organizada dos critérios.

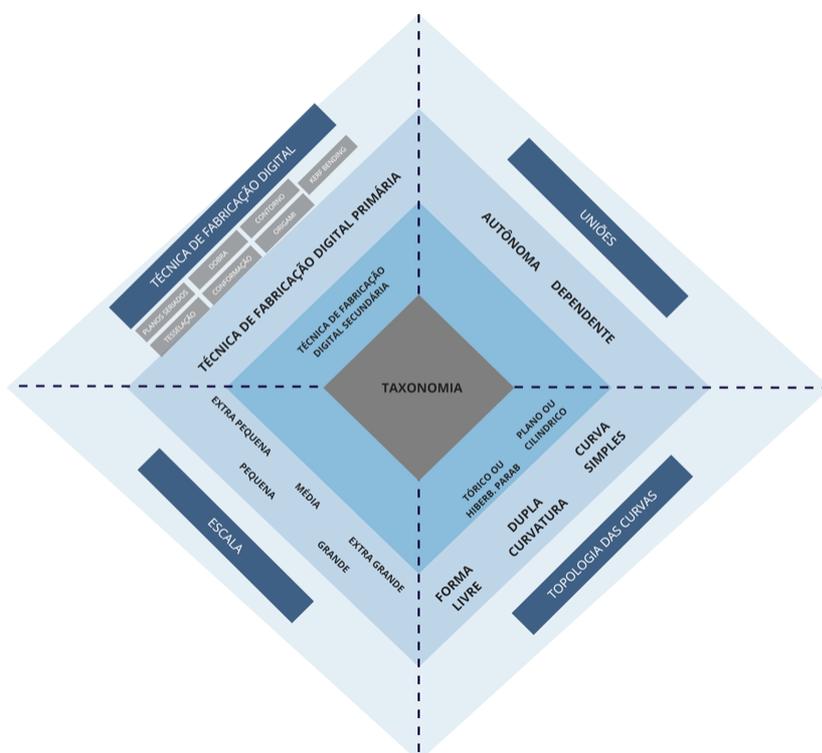
Quadro 5 – Categorias para taxonomia

<ul style="list-style-type: none">1. Escala:<ul style="list-style-type: none">○ Pequena: Mobiliário para usuário○ Média: Escala arquitetônica na qual abriga pessoas○ Grande: Escala que abriga mais pessoas○ Extra grande: Escala arquitetônica que abriga multidões2. Formas para fabricação digital (IWAMOTO, 2009):<ul style="list-style-type: none">○ Planos seriados○ Tesselação○ Dobra○ Contorno○ Formação○ Kerf bending○ Origami3. Topologia da curva (CAPONE; LANZARA, 2019):<ul style="list-style-type: none">○ Forma livre○ Dupla Curvatura<ul style="list-style-type: none">▪ Tórico ou hiperbólico parabolóide○ Curva simples<ul style="list-style-type: none">▪ Plano ou cilíndrico4. Uniões entre os elementos:<ul style="list-style-type: none">○ Autônoma○ Dependente

Fonte: Autoria própria

Dessa maneira, a Figura 11 apresenta as quatro categorias (escala, técnica de fabricação digital, topologia das curvas e uniões) dispostas de forma autônoma para permitir a exploração de um conjunto mais abrangente de possibilidades pelo projetista ao refinar o objeto arquitetônico. Essas categorias auxiliam o projetista a tomar as primeiras decisões sobre a forma arquitetônica, como exemplificado na Figura 82.

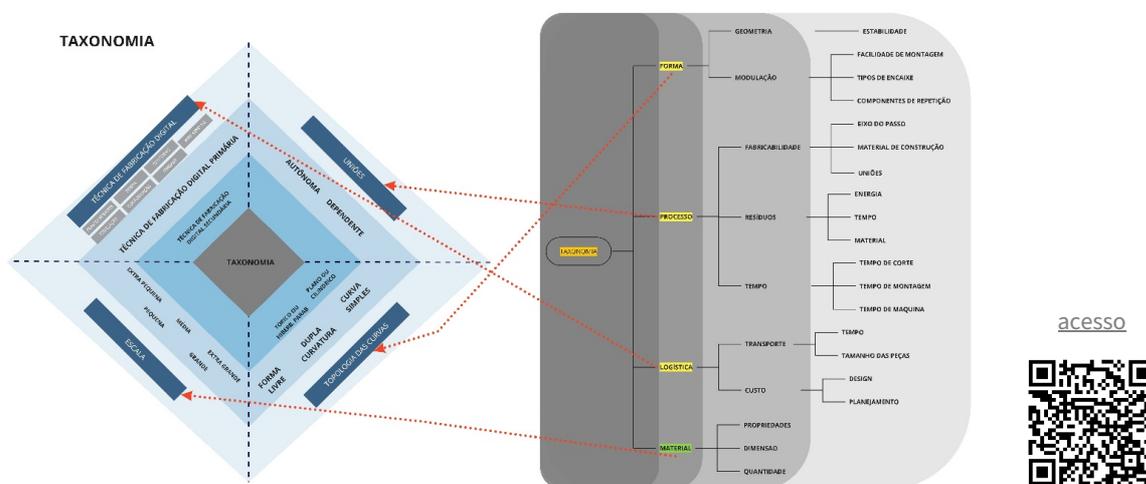
Figura 82 – N.º 11 | Proposição dos critérios no losango



Fonte: Autoria própria

Na imagem 12, foi feita a fusão entre dois gráficos diferentes: o primeiro apresenta uma hierarquia de quatro categorias - forma, processo, logística e material (Figura 80), enquanto o segundo apresenta as quatro questões independentes - escala, técnica de fabricação digital, topologia das curvas e uniões - para auxiliar nas primeiras decisões sobre a forma arquitetônica (Figura 82). Os gráficos foram relacionados de forma a compor os quadrantes existentes na Figura 83.

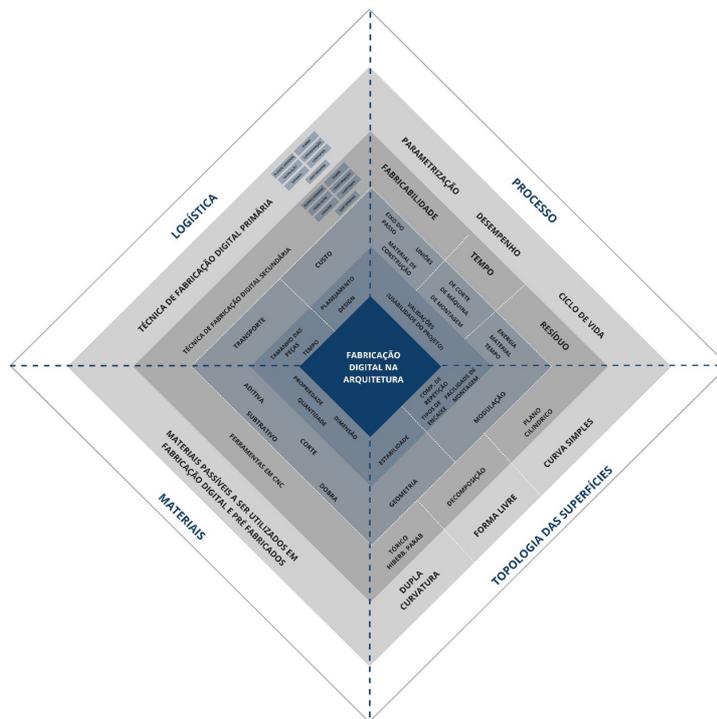
Figura 83 – N.º 12 | União de duas disposições taxonômicas



Fonte: Autoria própria

No intuito de simplificar e facilitar a leitura, buscou-se outro modo que pudesse abarcar todos os critérios. Assim, na imagem n.º 13 uniu-se todas as categorias e critérios das taxonomias estudadas. Nessa fusão, as categorias gerais foram compiladas em logística, processo, materiais e topologia das curvas, e adicionam-se os critérios de parametrização, desempenho e ciclo de vida. O primeiro subcritério abordava o modo que o objeto pode ser parametrizado, o segundo trata do desempenho ambiental e/ou estrutural da geometria e o terceiro subcritério aborda questões relacionadas à durabilidade da forma, seja ela efêmera ou não. Como no modelo anterior, o projetista começa pelas categorias gerais e, em seguida, encaminha-se para as questões internas na segunda e terceira camada (Figura 84).

Figura 84 – N.º 13 | União dos critérios em um losango



[acesso](#)

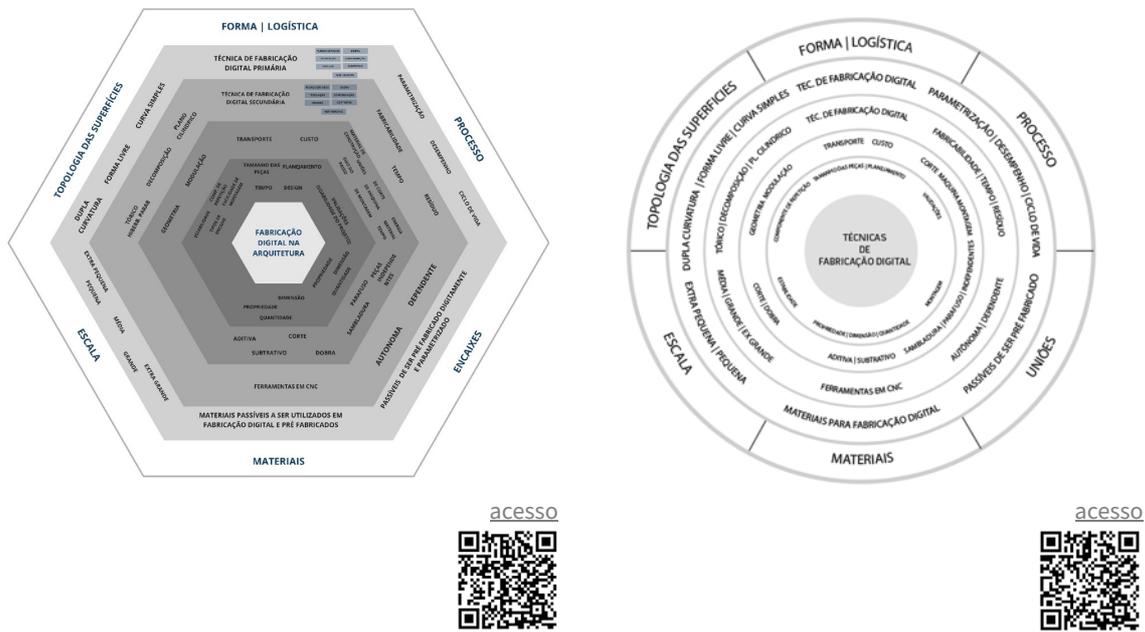


Fonte: Autoria própria

Diante da complexidade da disposição anterior, que envolvia uma grande quantidade de critérios e níveis, procurou-se encontrar uma nova forma de organizar as categorias e critérios, diferente da apresentada no passo 13. Essa nova abordagem foi motivada pela necessidade de tornar a taxonomia mais intuitiva e de fácil utilização para os projetistas. O objetivo foi criar uma disposição mais fluida e ordenada, que permitisse uma interação mais eficaz com o projetista durante o processo de utilização da taxonomia. Com isso, no passo 14 mostra-se as quatro categorias apresentadas anteriormente, acrescidas das categorias de escala e uniões. Como todas as categorias foram essenciais para diversificar as opções de projeto, organizou-se em uma geometria com seis partes. Na qual, as categorias gerais são apresentadas em branco e a categorização é refinada por meio da graduação da cor cinza.

Durante o processo, foram realizados dois testes para dispor os critérios: o primeiro teste em uma forma de hexágono e outro em um círculo divididos em seis partes. As duas geometrias propostas permitem uma organização flexível dos critérios, possibilitando o reposicionamento das categorias e critérios à medida que o projetista faz suas escolhas para a forma arquitetônica. O usuário poderia começar o projeto por um dos lados (categorias) na zona mais externa e, a partir disso, percorrer os outros critérios para a direita, esquerda ou para o interior da geometria. Conforme, o projetista percorresse as categorias, mais critérios seriam apresentados. Isso facilitaria o entendimento das possibilidades e limitações que o objeto arquitetônico pode ter, conforme a Figura 85.

Figura 85 – N.º 14 | Polígono com os critérios



Fonte: Autoria própria

Entendendo a vasta quantidade de critérios, buscou-se, mais uma vez, checar se todos os critérios seriam necessários. Esse processo de checagem aconteceu na imagem 8 (Figura 78) e agora, a partir de procedimentos técnicos para entender a relevância

desses critérios que culminará em uma matriz de relação (Figura 86). Dessa maneira reuniu-se todos os critérios e adotou-se os seguintes procedimentos:

- a) dispor em paralelo as taxonomias com a descrição qualitativa de cada critério;
- b) distribuir os critérios entre os temas e grupos;
- c) buscar redundâncias e, quando possível, uni-los;
- d) submeter os critérios a uma matriz de relação para entender sua inter-relação;
- e) reagrupar os critérios em novos grupos ou temas, quando necessário;
- f) sintetizar os critérios em categorias.

Nesse processo, identificou-se 53 critérios que foram descritos e classificados em três tipos: quantitativos, classificatórios para a geometria e geradores de forma. Esses critérios foram reorganizados hierarquicamente em um novo arranjo com 27 critérios, que foram dispostos em paralelo para facilitar o entendimento. Em seguida, os critérios foram submetidos a uma matriz de relação para determinar sua inter-relação, observando-se quais critérios poderiam ser sobrepostos ou eliminados e quais teriam pertinência em cada grupo temático ou deveriam ser realocados. A Figura 86 mostra o resultado desse processo na matriz de relação.

Figura 86 – Matriz de relação para critérios

CRITÉRIOS	EXPLICAÇÃO DE CADA CRITÉRIO	CRITÉRIOS																											
		4.4.4.Laser	4.4.3.CNC	4.4.2.Corte	4.4.1.Facilidade de montagem	3.3.1.2. Parabolóide	3.3.1.1. Parabolóide	3.3.1.0. Estabilidade	3.3.1. Plano cilíndrico	3.3.1. Curva simples	3.2.1. Decomposição	3.2. Forma livre	3.1.1. Torção e hiperbólico	3.1.0. Dupla curvatura	2.2.3. Tempo de corte / máquina	2.2.2. Tempo de montagem	2.2.1. Material (resíduo)	2.1. Desempenho	2.1.1.2. União	2.1.1.1. Eixo de passo	2.1.1.0. Custo	2.1. Transporte	1.3. Curvo	1.3. Tensão	1.3. Kerf Bending	1.3. Conformação	1.3. Contorno	1.3. Corte	1.3. Dobra
3 1.1.1. Dobra		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4 1.1.2. Corte		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5 1.1.3. Contorno		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6 1.1.4. Conformação	uma opção anula a outra	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7 1.1.5. Tesselação		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8 1.1.6. Kerf Bending		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10 1.2. Transporte (transportabilidade)	[TRANSPORTABILIDADE] se é possível transportar ou não	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13 1.3. Custo	aborda sobre o custo	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17 2.1. Parametrização	se utiliza parametrização no processo de concepção?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
19 2.1.1.1. Eixo de passo (preciso de passo)	trocar nome Eixo de passo (preciso de passo) se há uma preocupação com a fabricação	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 2.1.1.2. União	se é possível de ser unido ou ser factível de usado na escala humana?	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22 2.2. Desempenho	se considera algum tipo de desempenho no projeto	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24 2.2.1. Tempo de corte / máquina	Tempo de corte da peça quanto é muito ou pouco? Tempo de corte e de montagem podem ser fundir	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 2.2.1.3. Tempo de montagem	Se vai ser considerado ou não	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29 2.2.2.2. Material (resíduo)	Pelo nesting e natureza de cada critério, quanto é muito quanto é pouco?	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33 3.1. Dupla curvatura (tipo de superfície)		1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34 3.1.1. Torção e hiperbólico parabolóide (tipo de superfície)		1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35 3.2. Forma livre (tipo de superfície)		1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36 3.2.1. Decomposição		1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37 3.3. Curva (superfície) simples (tipo de superfície)		1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38 3.3.1. Plano cilíndrico (tipo de superfície)		1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40 3.3.1.1. Estabilidade	se o elemento é estável ou não	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41 3.3.1.2. Modulação	se é possível de ser modulado ou não	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44 3.3.1.3. Facilidade de montagem	se a montagem é fácil ou não	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49 4.1.3. Corte - CNC Router	Dipção que se excluem, ou podem ser somadas como técnicas secundárias ou primárias	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50 4.1.4. Laser		1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria

Com base na matriz de relação, os critérios foram distribuídos em uma nova taxonomia. Essa geometria, assim como as outras, permite que o projetista navegue pelas categorias em qualquer direção, tornando-a uma figura flexível. Discutiu-se as categorias relativas aos aspectos projetuais, as diversas técnicas de fabricação digital, incluindo as técnicas de Iwamoto (2009) e outras mais utilizadas, a topologia das curvas para gerar superfícies, a escala do objeto (pequena, média, grande e extragrande) e o maquinário necessário para a fabricação do objeto arquitetônico. Esses critérios foram organizados em um hexágono com uma seta ao meio, indicando a ciclicidade da aplicação (ver Figura 87).

Figura 87 – N.º 15 | Disposição dos critérios em um hexágono



[acesso](#)



Fonte: Autoria própria

Através de processo de desenvolvimento, embasado na pesquisa construtiva como abordagem metodológica. Os critérios foram organizados em uma tabela com os autores correspondentes a cada um deles. A intenção é deixar claro como cada critério se fundamenta na taxonomia.

Este é o primeiro resultado da taxonomia e refere-se ao objetivo específico IV desse trabalho. Identificou-se que os critérios mais relevantes poderiam ser agrupados em categorias e sintetizou-se nos aspectos essenciais para o processo de projeto (categoria de aspectos projetuais), formas para Fabricação Digital, a topologia das curvas, a escala do objeto (pequena, média, grande e extragrande) e os materiais utilizados, conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 – Relação entre autores e critérios

Códigos/Critérios	AUTORES
1. Aspectos projetuais	Jacobs (1992), Cooper (2001), Bax e Trum (2000, 2002; 1996), Pupo (2008), Celani e Pupo (2009), Gebhardt (2011-), Chua (2003), Griz, Queiroz e Nome (2017), Austern et. al (2018) e Ashby (2019),
2. Formas para fabricação digital	Iwamoto (2009) e Capone (2019)
3. Topologias das curvas	Capone e Lanzara (2018, 2019) e Lanzara (2015)
4. Escala	Pupo (2008), Griz, Queiroz e Nome (2017) e Bax e trum (2002)
5. Materiais	Bax e trum (2002), Chua (2003), Austern et. al (2018), Ashby (2013), Agudelo (2017) e Vrouwe (2018).

Fonte: Autoria própria

Depois de concluir a primeira categorização, os critérios foram submetidos a uma segunda fase, onde foram desenvolvidos os critérios mais específicos. Isso permitiu detalhar cada critério em sua categoria, juntamente com os autores correspondentes, conforme mostrado no Quadro 7.

Quadro 7 – Critérios e autores

1 Aspectos projetuais		
1.1	Desempenho	Ashby (2013) e Sass e Botha (2006)
1.2	Resíduo	Ashby (2019)
1.3	Tempo – Corte, máquina e montagem	Bax e Trum (2000), Sass e Botha (2006) e Austern et. al (2018)
1.4	Transporte	Sass e Botha (2006), Austern et. al (2018) Griz, Queiroz e Nome (2017) e Ashby (2019),
1.5	Parametrização	Vrouwe (2018), Gebhardt (2011-), Dunn (2012) e Cooper (2001)
1.6	Modulação	Griz, Queiroz e Nome (2017) e Sass e Botha (2006)
1.7	Encaixe	Griz, Queiroz e Nome (2017), Chua (2003) e Bax e Trum (2002)
1.8	Estabilidade	Bax e trum (1996)
1.9	Montagem e desmontagem	Austern et. al (2018) e Sass e Botha (2006)
1.10	Fabricabilidade	Bax e Trum (2000, 2002; 1996), Sass e Botha (2006) e Vrouwe (2018),
1.11	Ferramentas CNC	
1.12	Eixo de passo (tool path)	Griz, Queiroz e Nome (2017)
1.13	Custo	Austern et. al (2018), Ashby (2019) e Bax e Trum (2000)
2 Formas para fabricação digital		
2.1	Dobra	Iwamoto (2009) e Dunn (2012)
2.2	Planos seriados	
2.3	Contorno	
2.4	Conformação	
2.5	Tesselação	
2.6	Kerf Bending	Capone e Lanzara (2018, 2019) e Lanzara (2015)
2.7	Origami	Capone e Lanzara (2018, 2019)
2.8	3d Printing	Griz, Queiroz e Nome (2017) e Austern et. al (2018)
3 Topologias das curvas		
3.1	Dupla curvatura	Capone e Lanzara (2018, 2019) e Lanzara (2015)
3.2	Forma livre	
3.3	Curva simples	
4 Escala		
4.1	Pequena	Pupo (2008), Griz, Queiroz e Nome (2017) e Bax e trum (2002)
4.2	Médio	
4.3	Grande	

4.4	Extra Grande	
5	Materiais	Bax e trum (2002), Chua (2003), Austern et. al (2018), Ashby (2013), Agudelo (2017) e Vrouwe (2018).

Fonte: Autoria própria

No último estágio do desenvolvimento, a taxonomia foi organizada em forma de círculo, levando em consideração a aplicação cíclica dela. Com base na literatura científica e no referencial teórico utilizado, os critérios foram distribuídos ao longo dessa figura, com eixos diagonais e perpendiculares.

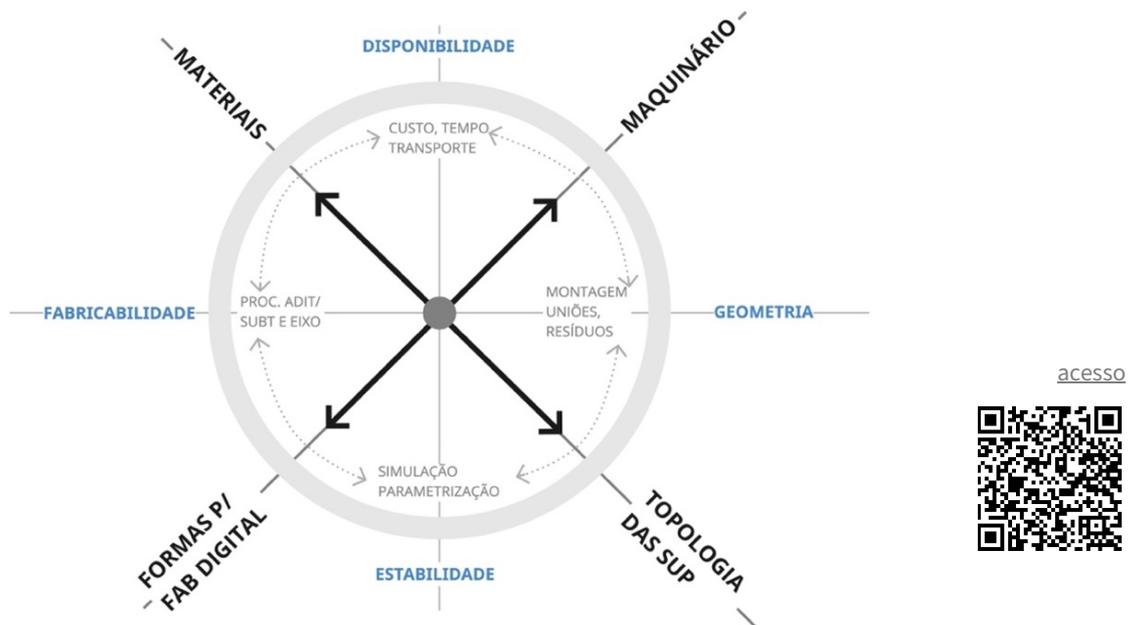
A ideia desta disposição é que, muitas vezes, o projetista pode não ter todas as respostas ou critérios quando começa a projetar algo. Por exemplo, pode decidir começar com uma máquina específica, um material mais barato ou uma forma que atenda a uma necessidade específica. Para isso, os projetistas necessitam compreender os conceitos dos diferentes critérios que a taxonomia engloba, como escala, tipo de superfície, maquinário, materiais e formas para fabricação digital. Além desse uso, a taxonomia se mostrou eficaz para a categorização e classificação de projetos consolidados; bem como para criação de formas complexas e personalizadas.

Desse modo, a taxonomia possui quatro categorias que foram dispostas nos eixos diagonais do círculo na cor preta: "formas para fabricação digital", "maquinário", "materiais" e "topologia das superfícies". Por sua vez, os critérios de "aspectos projetuais" foram distribuídos em toda a figura, ao redor do círculo nos eixos tipo cruz "+" e na cor cinza e azul. Essa estrutura proporciona clareza e orientação aos projetistas, ajudando-os a tomar decisões mais embasadas. A TDFab+Arch pode ser utilizada de forma flexível, permitindo ao projetista iniciar a avaliação em qualquer um dos eixos em preto e prosseguir no sentido horário ou anti-horário, conforme suas preferências e necessidades.

Durante o processo de desenvolvimento, a forma final recebeu a denominação de "Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura" ou TDFab+arch. A inclusão

do "arch" enfatiza o domínio de atuação da ferramenta, que é a arquitetura. Ao mesmo tempo, o símbolo de adição (+) sugere que a taxonomia pode ser aplicada em outros contextos, como engenharia, produção, design, conforme a Figura 88.

Figura 88 – N.º 16 | Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura



Fonte: Autoria própria

O objetivo da ferramenta é possibilitar que os projetistas, ao definirem a escala do modelo, iniciem o processo de projeto selecionando uma das categorias e critérios apresentados nos eixos. As categorias são representadas em preto, enquanto os critérios relacionados aos "aspectos projetuais" são destacados em azul, e os critérios relacionados aos "aspectos materiais" são representados em cinza claro dentro da figura. As setas indicam a direção e ajudam o usuário a compreender a bidirecionalidade do uso, podendo ser percorridas no sentido horário ou anti-horário. Para compreender a TDFab+Arch, as categorias foram organizadas da seguinte maneira:

- Entre os eixos de materiais e maquinário há os critérios de disponibilidade que aborda a variedade dos materiais da região em comparação ao maquinário disponível, então isso tem um impacto direto no custo, tempo e transporte para a materialização arquitetônica do objeto; ou ainda pode-se ler como a disponibilidade do custo, tempo e transporte, isso como um fator limitante e norteador da forma arquitetônica;
- entre maquinário e topologia das superfícies há os critérios que influenciam na geometria, em como será a superfície do objeto planejado (forma simples, dupla curvatura ou forma livre) e se é compatível com o maquinário; desse modo, a montagem da geometria escolhida, uniões entre as peças e resíduos são fatores determinantes para a fabricação. Uma vez que estão entrelaçados e se influenciam;
- entre topologia de superfícies e formas para fabricação digital há o critério de estabilidade, na qual através de simulação computacional (desempenho ambiental ou estrutural), parametrização ou da plataforma BIM, é possível ter um auxílio nos processos de tomada de decisão da técnica de fabricação mais adequada, seja ela contorno, planos seriados conformação ou dobra;
- entre formas para fabricação digital e materiais, o impacto da materialização está na fabricabilidade do objeto. Na qual a variedade de materiais vai impactar em qual técnica de fabricação digital será utilizada; assim há uma preocupação na relação entre os processos aditivos, subtrativos (impacto do eixo de passo) e a materialização.

A abordagem entre as categorias e critérios auxilia na clareza das decisões que precisam ser tomadas e servir como guia para os projetistas. Desse modo, a TDFab+Arch pode ser utilizada no sentido horário ou anti-horário e partir de qualquer decisão prévia do projetista; seja ela o maquinário existente, material disponível, o custo como fator determinante ou até o domínio de algum tipo de encaixes.

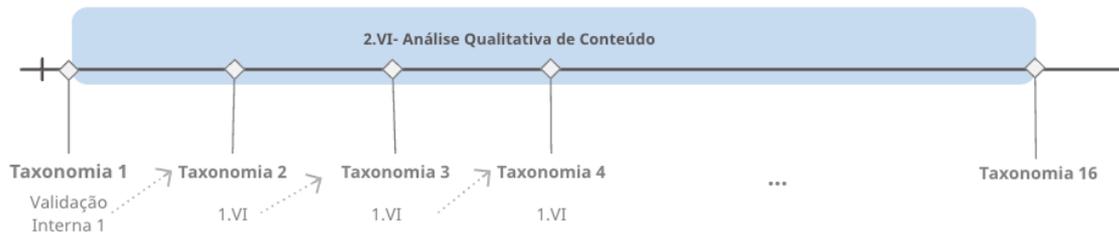
Contudo, a TDFab+Arch apresenta uma estrutura coerente e abrangente que descreve o processo de fabricação digital em diversas escalas. Desde a criação da hierarquia da taxonomia (Número 9 na Figura 79) até a disposição em forma de círculo, houve uma caracterização e reestruturação dos critérios, com o objetivo de reduzir a redundância de termos. A TDFab+Arch oferece uma estrutura cíclica e flexível, permitindo que o projetista comece a partir de qualquer critério prévio, como maquinário, materiais ou custo. As categorias apresentadas, como formas para fabricação digital, maquinário, materiais e topologia das superfícies, e os aspectos projetuais podem ser adaptados e reorganizados de acordo com as necessidades específicas do projeto. Dessa maneira, a ferramenta pode servir como um guia para o projetista ao longo do processo de criação, ajudando a garantir que as decisões e opções sejam consideradas e fundamentadas.

3.3. Análise qualitativa de conteúdo (AC)

A análise qualitativa de conteúdo (AC) contribui para fase de “proposição” da abordagem metodológica e o objetivo específico III discutido na etapa C. AC ainda é a segunda etapa do processo de validação interna (item 1.3) que foi formulada por Krippendorff (2004). O desenvolvimento da AC foi essencial para validar e refinar a Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch).

A análise qualitativa identificou os padrões e relações entre os critérios da taxonomia, por meio da codificação dos artigos e a partir disso reformular a taxonomia. Essa etapa ocorreu em paralelo ao desenvolvimento da TDFab+Arch e o processo de síntese dos critérios, conforme a Figura 89.

Figura 89 – Desenvolvimento da AC com a taxonomia



Fonte: Autoria própria

A AC foi aplicada nos artigos que compõe o universo de estudo da revisão sistemática de literatura 2 (RSL 2), para isso elaborou-se um protocolo de codificação (KRIPPENDORFF, 2004) que categorizou critérios e destacou as relações mais comuns recorrentes entre eles.

O objetivo do protocolo de codificação adotado nesta pesquisa é categorizar e atribuir significado equitativo aos trechos dos artigos. Os códigos usados são os critérios desenvolvidos para a taxonomia (presentes nos Quadro 6 e Quadro 7), o que possibilitou verificar a consistência na organização e agrupamento dos critérios. Isso pode ser ilustrado pelo trecho de Kontovourkis *et. al*(2019):

Paralelamente, a seleção do fluxo de trabalho adequado reconhece as dificuldades das tarefas envolvidas durante a fase de construção, onde é necessário um processo de fabricação minucioso e preciso e, ao mesmo tempo, o envolvimento de um mecanismo de baixa tecnologia/custo para execução de fabricação rápida é necessária. Dentro deste quadro, um exame sobre otimização e construção em larga escala de estruturas de casca de forma livre

mostra duas direções básicas de investigação.² (Tradução nossa)
(KONTOVOURKIS; PHOCAS; KATSAMBAS, 2019, p. 3)

Neste trecho, aplicou-se os códigos relevantes para o processo projetual: escala, topologia da superfície, forma livre, maquinário, aspectos projetuais, tempo e custo. Posteriormente, realizou-se a codificação dos artigos, permitindo uma análise quantitativa dos dados coletados. Essa análise consiste na contagem das recorrências de cada código e na identificação de relações entre eles. Dessa forma, foi possível identificar os padrões e relacionamentos mais recorrentes, além de revelar quais critérios não estão relacionados com nenhum outro ou o processo projetual.

Na análise dos artigos da RSL 2, os códigos utilizados foram representados por cores na tabela, "escala" na cor azul, "formas para fabricação digital" em vermelho, "topologia de superfície" em amarelo, "maquinário" na cor laranja, "materiais" em cinza e "aspectos projetuais" em verde. Os resultados das análises foram apresentados em uma tabela quantitativa e um gráfico que mostra a relação entre as categorias e critérios. No gráfico, quanto maior a espessura da linha, mais conexões os critérios possuem com os outros critérios descritos no lado esquerdo.

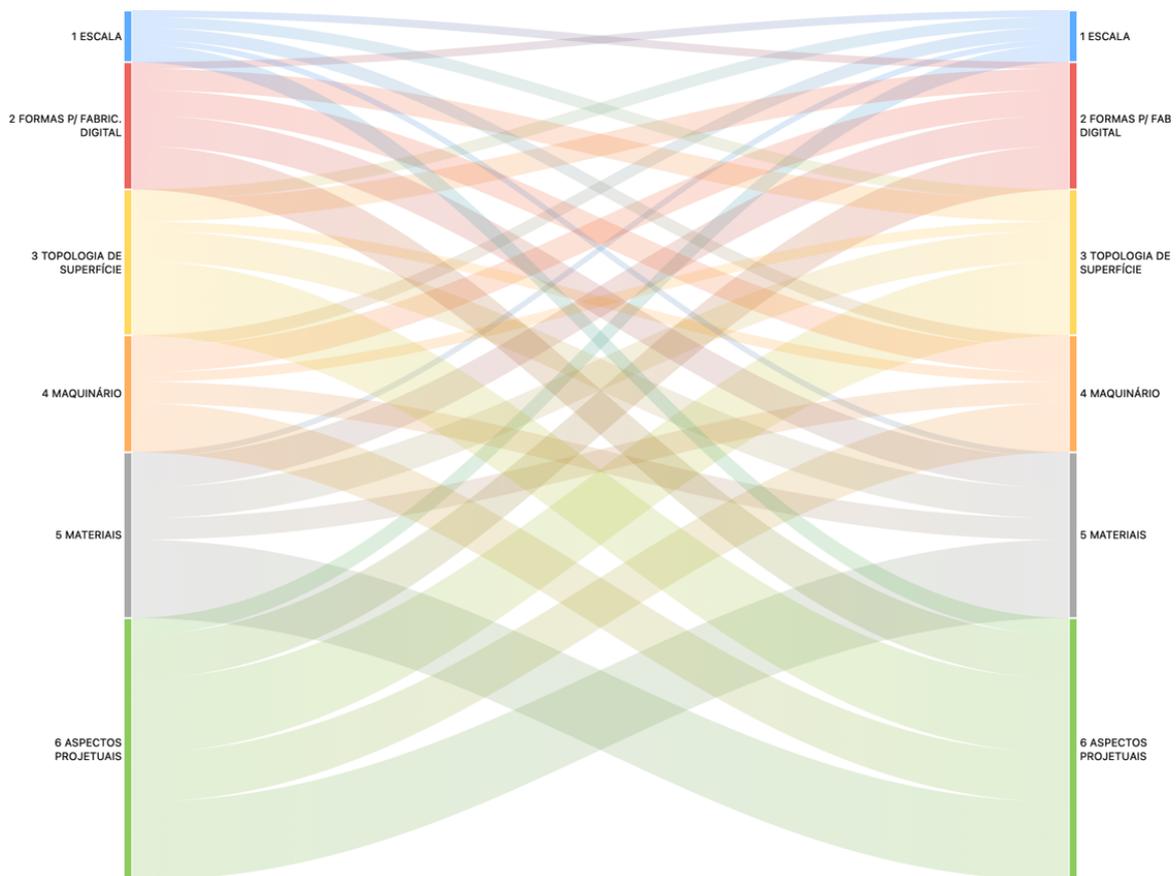
Realizou-se a primeira AC entre as categorias gerais dos critérios para verificar se elas têm conexão entre si. Essa análise revela que as cinco categorias estão relacionadas

2 Trecho original “*In parallel, the selection of the appropriate work- flow acknowledges the difficulties of the tasks involved during the construction phase, where a thorough and accurate fabrication process is necessary, and at the same time, the involvement of a low-tech/cost mechanism for rapid manufacturing execution is required. Within this frame, an examination over optimization and large-scale construction of free-form shell structures shows two basic directions of investigation.*”(KONTOVOURKIS; PHOCAS; KATSAMBAS, 2019, p. 3)

entre si, na qual a maior frequência ocorre em "aspectos projetuais" e "materiais", seguidas por "topologia de superfícies" e "maquinário". Observou-se que os critérios que compõem "aspectos projetuais" se relacionam com todas as categorias nos artigos analisados, indicando que é um elemento comum entre eles, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Relacionamento entre as categorias

Nota: a) gráfico tipo sankey b) Tabela com os dados de ocorrência

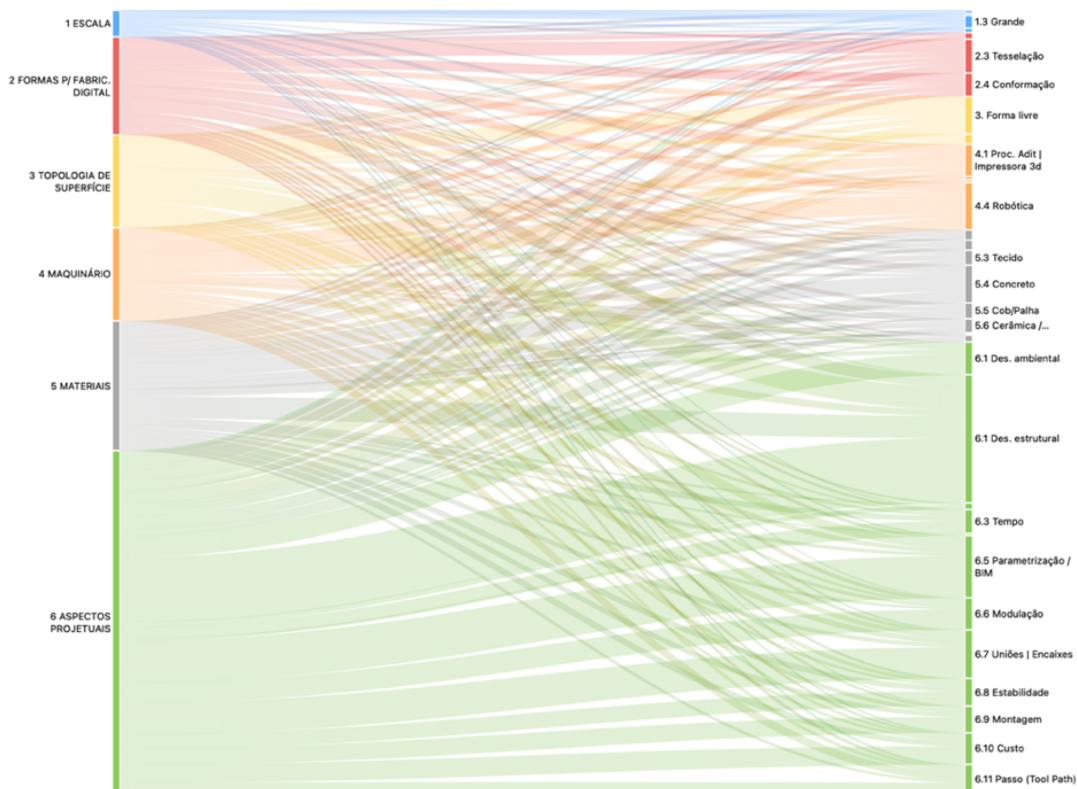


	1 ESCALA	2 FORMAS P/...	3 TOPOLOGI...	4 MAQUINÁRIO	5 MATERIAIS	6 ASPECTOS...
1 ESCALA	21	5	8	9	4	13
2 FORMAS P/ FABRIC. DIGITAL	5	53	16	19	23	33
3 TOPOLOGIA DE SUPERFÍCIE	8	16	68	7	23	56
4 MAQUINÁRIO	9	19	7	57	16	37
5 MATERIAIS	4	23	23	16	82	59
6 ASPECTOS PROJETUAIS	13	33	56	37	59	241

Fonte: Autoria própria

Na próxima análise qualitativa, relaciona-se as cinco categorias com os todos os critérios propostos na codificação. Tem-se que o subcritério mais frequente é o "desempenho estrutural", seguido por "parametrização/BIM" e "uniões/encaixes", que se relacionam com as categorias de "materiais", "topologia da superfície" e "formas para fabricação digital". Essa interação indica a preocupação com o desempenho da estrutura e o uso de parametrização, como caminho para resolver. Além disso, destaca-se a relação com a estabilidade a partir dos encaixes e a preocupação na materialização da geometria. Ressalta-se a alta ocorrência de objetos fabricados com ferramentas robóticas, projetos com forma livre na categoria "topologia da superfície" e as técnicas de tesselação e conformação com maior número na categoria "formas para fabricação digital". A maioria dos experimentos foram realizados em escala grande, conforme a representação gráfica e a Tabela 3.

Tabela 3 – Análise geral dos artigos da RSL 2

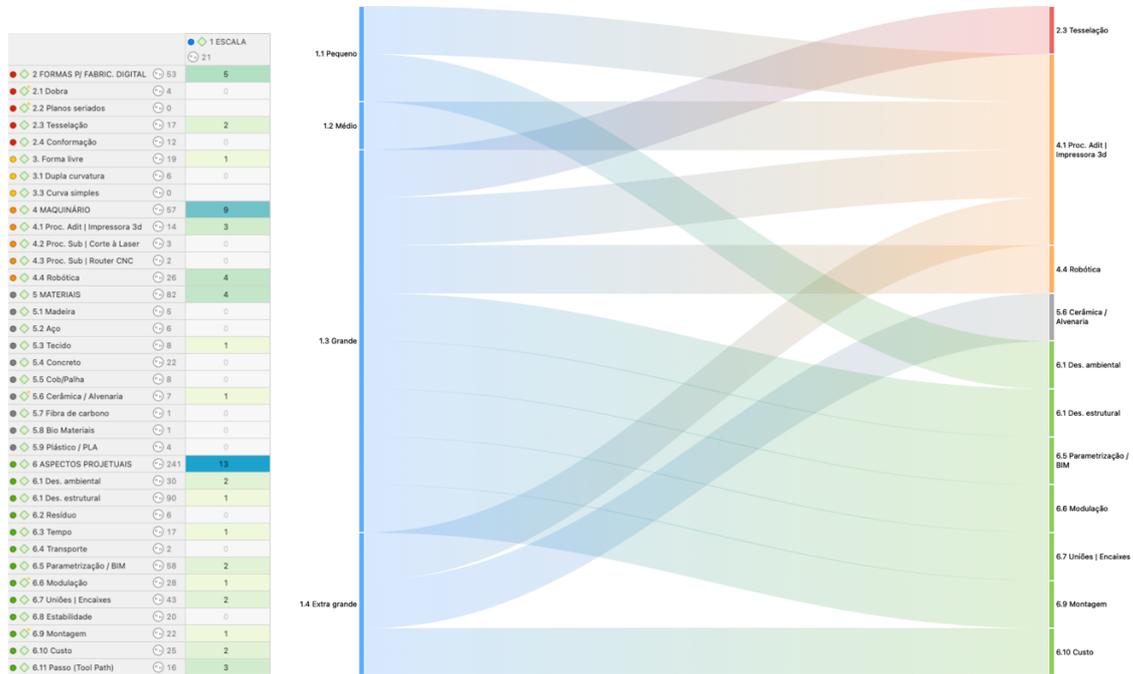


	1 ESCALA 21	2 FORMAS P/... 53	3 TOPOLOGI... 68	4 MAQUINÁRIO 57	5 MATERIAIS 82	6 ASPECTOS... 241
1.1 Pequeno	2	2	1	0	1	0
1.2 Médio	1	1	1	0	1	0
1.3 Grande	7	6	3	2	3	4
1.4 Extra grande	1	1	1	1	1	1
2.1 Dobra	4	0	4	1	0	1
2.3 Tesselação	17	2	17	6	6	4
2.4 Conformação	12	0	12	3	2	8
3. Forma livre	19	1	6	19	3	8
3.1 Dupla curvatura	6	0	1	6	0	1
4.1 Proc. Adit Impressora 3d	14	3	11	2	14	8
4.2 Proc. Sub Corte à Laser	3	0	0	0	3	0
4.3 Proc. Sub Router CNC	2	0	0	0	2	1
4.4 Robótica	26	4	9	4	26	6
5.1 Madeira	5	0	1	1	2	5
5.2 Aço	6	0	1	2	0	6
5.3 Tecido	8	1	1	4	0	8
5.4 Concreto	22	0	9	3	3	21
5.5 Cob/Palha	8	0	5	0	6	8
5.6 Cerâmica / Alvenaria	7	1	1	2	1	7
5.7 Fibra de carbono	1	0	0	0	1	1
5.8 Bio Materiais	1	0	0	0	0	1
5.9 Plástico / PLA	4	0	2	0	2	4
6.1 Des. ambiental	30	2	2	6	1	5
6.1 Des. estrutural	90	1	16	31	9	30
6.2 Resíduo	6	0	2	0	0	1
6.3 Tempo	17	1	3	2	3	7
6.4 Transporte	2	0	0	0	0	1
6.5 Parametrização / BIM	58	2	4	12	6	4
6.6 Modulação	28	1	5	3	4	3
6.7 Uniões Encaixes	43	2	4	6	7	5
6.8 Estabilidade	20	0	3	5	3	7
6.9 Montagem	22	1	3	0	5	6
6.10 Custo	25	2	3	3	3	8
6.11 Passo (Tool Path)	16	3	4	4	11	3

Fonte: Autoria própria

Ao isolar a categoria e relacionar cada subcritério com todos os outros critérios, tem-se que em "Escala", as escalas "pequena" e "média" que possuem relação com a categoria "Maquinário", tendo a "impressora 3D" como um critério relacionado ao "Desempenho Ambiental". Identifica-se que escala pequena é mais fácil realizar protótipos, a partir da alta relação com a impressora 3D. Na escala grande há uma recorrente quantidade de conexões com outros critérios, como "Desempenho Estrutural", "Parametrização/BIM", "Modulação", "Uniões/Encaixes" e "Montagem". Nessa escala também é comum a utilização de ferramentas robóticas e impressoras 3D para a materialização, assim como na escala extragrande. Nessa escala percebe-se uma preocupação com os custos das construções (Tabela 4).

Tabela 4 – AC | Escala

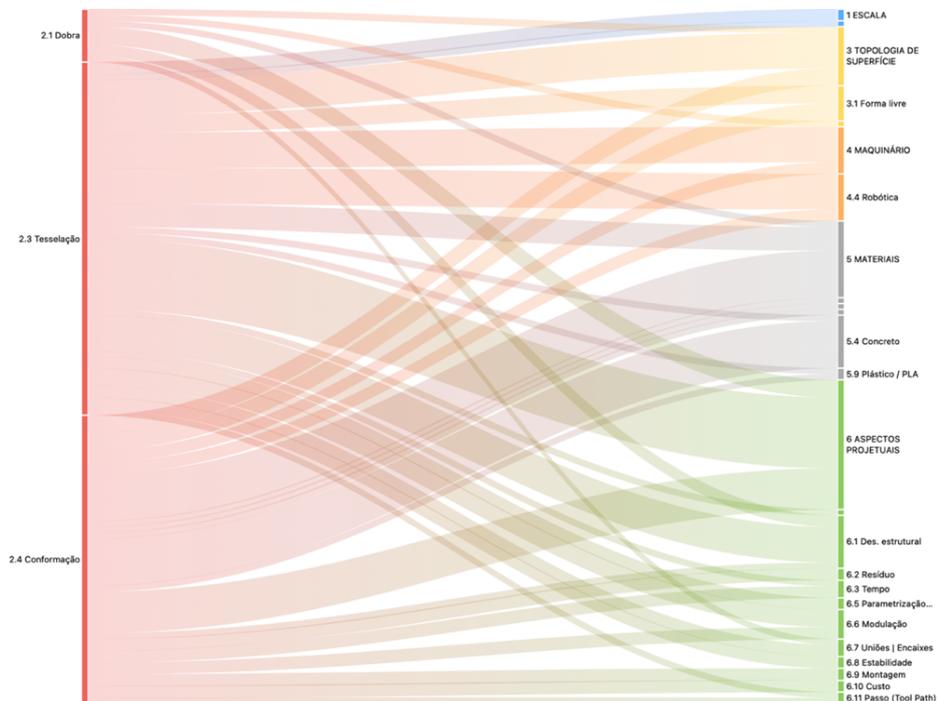


Fonte: Autoria própria

Na categoria "formas para fabricação digital" existem critérios relevantes para a análise, como "tesselação" e "conformação". A "tesselação" está relacionada com os critérios "aspectos projetuais", "topologia de superfície" e "maquinário", com destaque para as relações com "robótica" e "desempenho estrutural". Em "conformação" destaca-se também "materiais" e "concreto" como forma de materializar "formas livres". Por fim, os critérios de "aspectos projetuais" aparecem relacionando todas as categorias de "formas para fabricação digital", como custo, montagem, modulação, resíduo e tempo, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – AC | Formas para fabricação digital

		2.1 Dobra 4	2.3 Tesselação 17	2.4 Conforma... 12
1 ESCALA	21	0	2	0
1.3 Grande	7	0	1	0
3 TOPOLOGIA DE SUPERFÍCIE	68	1	6	3
3.1 Forma livre	19	0	3	3
3.2 Dupla curvatura	6	1	0	0
4 MAQUINÁRIO	57	0	6	2
4.4 Robótica	26	0	6	2
5 MATERIAIS	82	1	4	8
5.1 Madeira	5	0	0	1
5.2 Aço	6	0	0	1
5.3 Tecido	8	0	0	1
5.4 Concreto	22	0	1	8
5.9 Plástico / PLA	4	0	1	1
6 ASPECTOS PROJETUAIS	241	3	12	7
6.1 Des. ambiental	30	0	1	0
6.1 Des. estrutural	90	2	6	1
6.2 Resíduo	6	0	0	2
6.3 Tempo	17	0	1	2
6.5 Parametrização / BIM	58	0	2	0
6.6 Modulação	28	0	3	2
6.7 Uniões Encaixes	43	1	2	0
6.8 Estabilidade	20	0	2	0
6.9 Montagem	22	0	0	2
6.10 Custo	25	0	0	2
6.11 Passo (Tool Path)	16	0	1	1

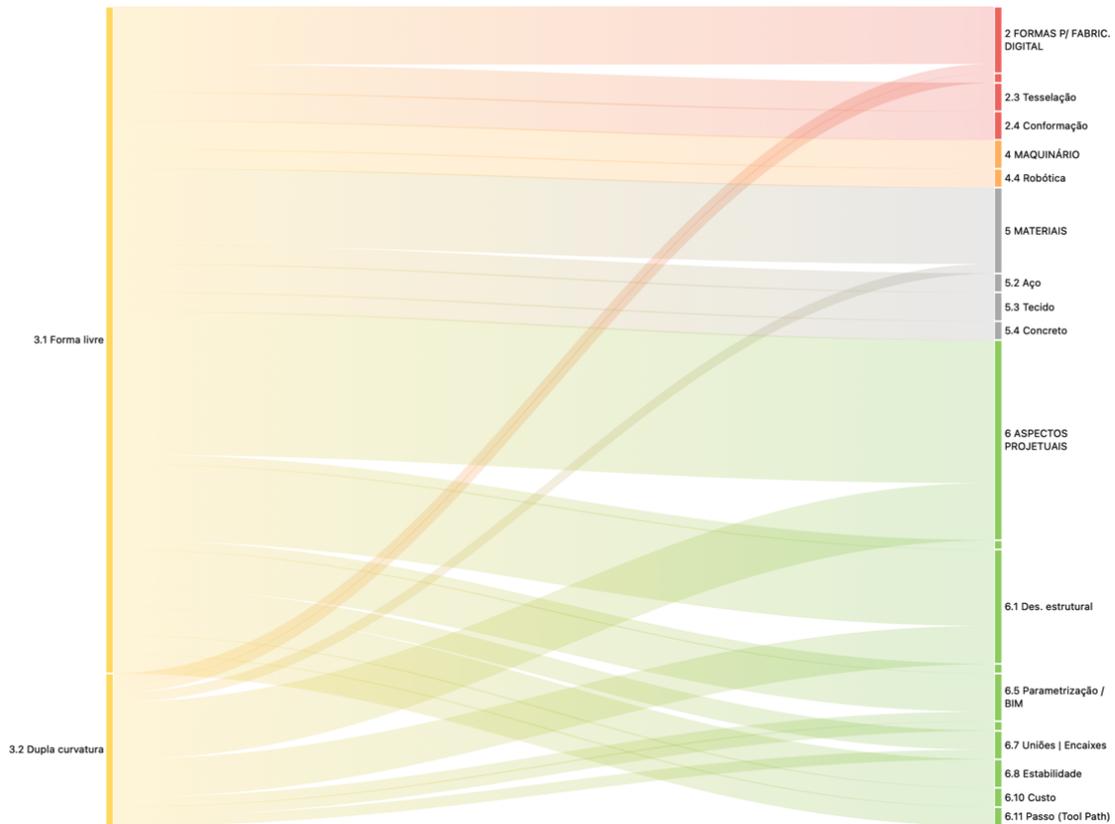


Fonte: Autoria própria

A categoria "topologia da superfície" possui relação com os "aspectos projetuais", destacando a conexão entre "forma livre" e "desempenho estrutural". Também se relaciona com as "formas para fabricação digital" e materiais como "aço", "tecido" e "concreto". No critério de "dupla curvatura", há a conexão tanto com os "aspectos projetuais" quanto com o "desempenho estrutural", conforme a Tabela 6. Outro critério nesse processo de materialização é a estabilidade com auxílio da parametrização e BIM, que também está presente nessa análise.

Tabela 6 – AC | Topologia da superfície

		 3.1 Forma livre  19	 3.2 Dupla cur...  6
  2 FORMAS P/ FABRIC. DIGITAL  53		6	1
  2.1 Dobra  4		0	1
  2.3 Tesselação  17		3	0
  2.4 Conformação  12		3	0
  4 MAQUINÁRIO  57		3	0
  4.4 Robótica  26		2	0
  5 MATERIAIS  82		8	1
  5.2 Aço  6		2	0
  5.3 Tecido  8		3	0
  5.4 Concreto  22		2	0
  6 ASPECTOS PROJETUAIS  241		15	6
  6.1 Des. ambiental  30		1	0
  6.1 Des. estrutural  90		8	4
  6.3 Tempo  17		1	0
  6.5 Parametrização / BIM  58		4	1
  6.6 Modulação  28		0	1
  6.7 Uniões Encaixes  43		2	1
  6.8 Estabilidade  20		3	0
  6.10 Custo  25		2	0
  6.11 Passo (Tool Path)  16		2	0

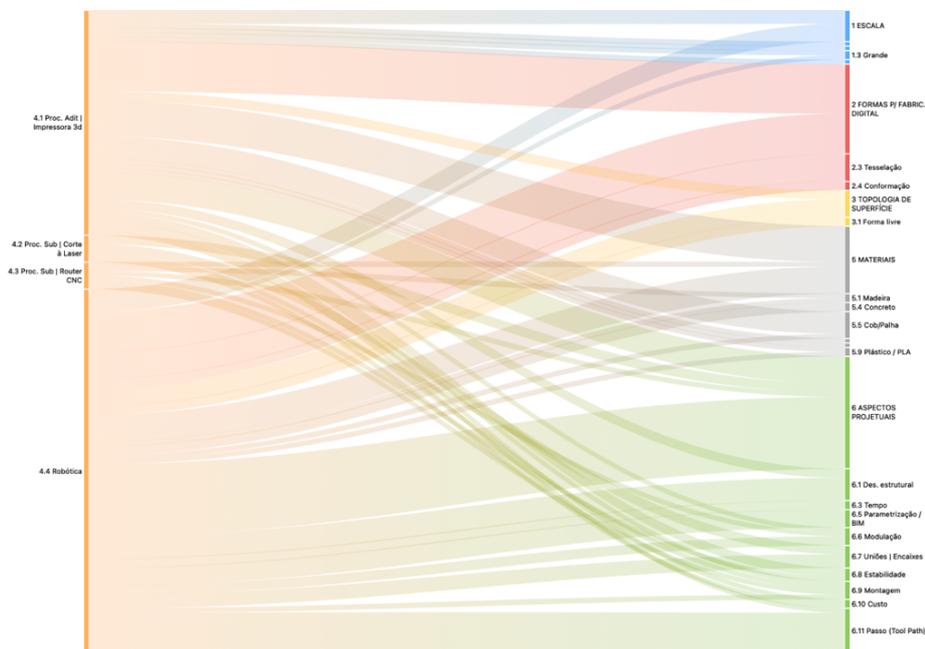


Fonte: Autoria própria

Em “Maquinário” destaca-se a existência da relação com as ferramentas de robótica utilizadas nos projetos. Na qual, há uma preocupação especial com o eixo do passo (*tool path*) e questões sobre o "desempenho estrutural", "parametrização / BIM" e "uniões / encaixes". Outro aspecto relevante é que as impressoras 3D também se relacionam com as formas para fabricação digital, materiais e aspectos projetuais, como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7 – AC | Maquinário

		4.1 Proc. Adit... 14	4.2 Proc. Sub... 3	4.3 Proc. Sub... 2	4.4 Robótica 26
1 ESCALA	21	3	0	0	4
1.1 Pequeno	2	1	0	0	0
1.2 Médio	1	1	0	0	0
1.3 Grande	7	1	0	0	1
1.4 Extra grande	1	1	0	0	0
2 FORMAS P/ FABRIC. DIGITAL	53	11	0	0	9
2.3 Tesselação	17	0	0	0	6
2.4 Conformação	12	0	0	0	2
3 TOPOLOGIA DE SUPERFÍCIE	68	2	0	0	4
3.1 Forma livre	19	0	0	0	2
5 MATERIAIS	82	8	0	1	6
5.1 Madeira	5	0	0	1	1
5.4 Concreto	22	0	0	0	2
5.5 Cob/Palha	8	5	0	0	1
5.6 Cerâmica / Alvenaria	7	1	0	0	0
5.7 Fibra de carbono	1	1	0	0	0
5.9 Plástico / PLA	4	1	0	0	1
6 ASPECTOS PROJETUAIS	241	6	2	1	16
6.1 Des. estrutural	90	2	0	0	5
6.3 Tempo	17	0	0	0	2
6.5 Parametização / BIM	58	0	0	0	4
6.6 Modulação	28	1	0	1	2
6.7 Uniões Encaixes	43	0	2	0	3
6.8 Estabilidade	20	2	0	1	0
6.9 Montagem	22	1	1	1	1
6.10 Custo	25	1	1	0	0
6.11 Passo (Tool Path)	16	1	0	0	9

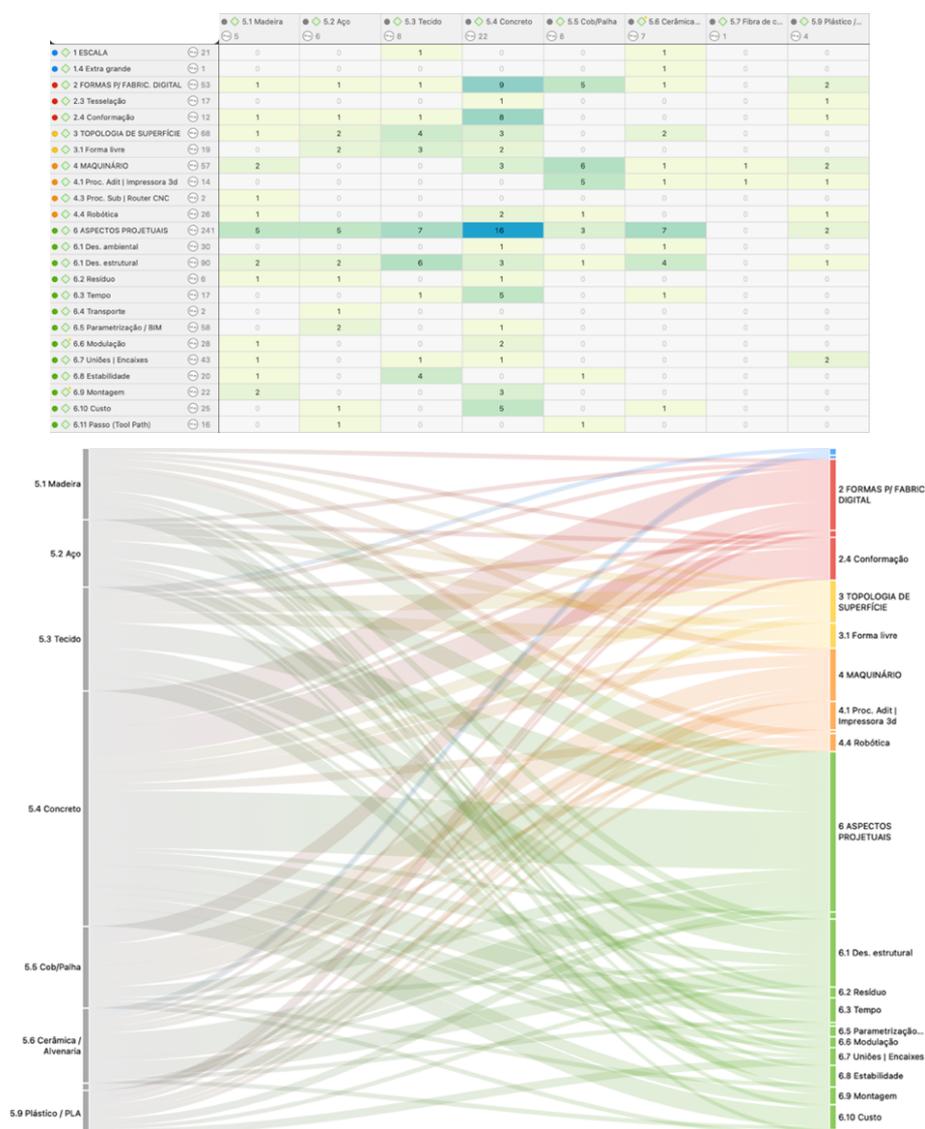


Fonte: Autoria própria

Na categoria de “materiais”, o concreto se destaca com maior recorrência em conjunto com técnica de fabricação digital de conformação e aplicação em tesselação.

Esse material também possui relação com as formas livres e o auxílio da ferramenta de robótica. Destaca-se ainda os critérios de desempenho ambiental e estrutural com conexões com os materiais encontrados nos artigos. Na análise há outros critérios que se destacam, como: resíduo, tempo, estabilidade, montagem, custo, uniões e modulação, como representado na Tabela 8.

Tabela 8 – AC | Materiais

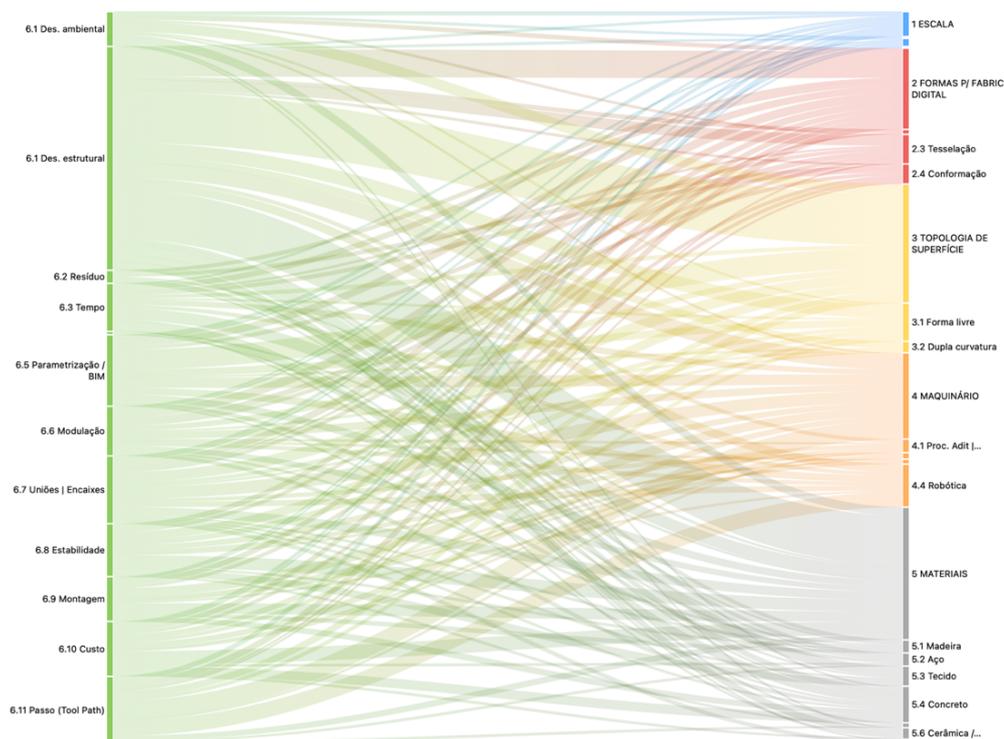


Fonte: Autoria própria

Conforme mencionado, o tema "aspectos projetuais" aparece em todos os artigos analisados, resultando em diversas relações entre os critérios da taxonomia. Em particular, destaca-se a importância do critério "desempenho estrutural" para objetos com formas livres e dupla curvatura, e o uso de tesselação para a fabricação dessas peças. Além disso, observa-se uma relação entre a modulação e as ferramentas de robótica, bem como o uso de materiais em madeira na escala grande. No critério "uniões e encaixes", também é possível identificar relações com a robótica e o corte a laser, bem como aplicações em formas que envolvem dobra e tesselação. As variáveis de custo e tempo apresentam relação com várias categorias, sendo especialmente relevantes nas escalas grande e extragrande, como mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – AC | Aspectos Projetuais

	6.1 Des. ambi...	6.1 Des. estru...	6.2 Resíduo	6.3 Tempo	6.4 Transporte	6.5 Parametri...	6.6 Modulação	6.7 Uniões E...	6.8 Estabilda...	6.9 Montagem	6.10 Custo	6.11
	30	90	6	17	2	58	28	43	20	22	25	16
1 ESCALA	2	1	0	1	0	2	1	2	0	1	2	3
1.1 Pequeno	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3 Grande	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0
1.4 Extra grande	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2 FORMAS PJ FABRIC. DIGITAL	2	16	2	3	0	4	5	4	3	3	3	4
2.1 Dobra	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2.3 Tesselação	1	6	0	1	0	2	3	2	2	0	0	1
2.4 Conformação	0	1	2	2	0	0	2	0	0	2	2	1
3 TOPOLOGIA DE SUPERFÍCIE	6	31	0	2	0	12	3	6	5	0	3	4
3.1 Forma livre	1	8	0	1	0	4	0	2	3	0	2	2
3.2 Dupla curvatura	0	4	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
4 MAQUINÁRIO	1	9	0	3	0	6	4	7	3	5	3	11
4.1 Proc. Adit Impressora 3d	0	2	0	0	0	0	1	0	2	1	1	1
4.2 Proc. Sub Corte à Laser	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0
4.3 Proc. Sub Router CNC	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0
4.4 Robótica	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
5 MATERIAS	0	5	0	2	0	4	2	3	0	1	0	9
5.1 Madeira	5	30	1	7	1	4	3	5	7	6	8	3
5.2 Aço	0	2	1	0	0	0	1	1	1	2	0	0
5.3 Tecido	0	2	1	0	1	2	0	0	0	0	1	1
5.4 Concreto	0	6	0	1	0	0	0	1	4	0	0	0
5.5 Cob/Palha	1	3	1	5	0	1	2	1	0	3	5	0
5.6 Cerâmica / Alvenaria	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
5.9 Plástico / PLA	1	4	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0



Fonte: Autoria própria

Compreende-se que os critérios de desempenho estrutural, montagem, uniões e encaixes, estabilidade, modulação e parametrização são relevantes na definição dos aspectos projetuais da forma. Além disso, as relações entre “materiais” e “maquinário”, como “robótica” devem ser consideradas também na concepção do projeto. As geometrias foram compostas por um sistema construtivo com diversos tipos de materiais, empregados tanto no aspecto estrutural quanto nos encaixes das geometrias.

O critério de "custo" também foi discutido no contexto dos aspectos projetuais e dos materiais, entendendo-se que a relação econômica para a produção da geometria arquitetônica depende do material utilizado. Essas relações foram frequentes devido à necessidade de definir quais aspectos projetuais devem ser empregados para determinados materiais e como isso afetaria a topologia da superfície e o maquinário por meio de técnicas de fabricação digital. Observou-se que dentro desse universo, todos os critérios apresentaram recorrência entre si.

A partir da aplicação dos critérios da taxonomia na análise dos artigos da RSL 2, destaca-se a importância da taxonomia e da categorização realizada previamente. A relação entre os critérios e identificar os possíveis critérios que compõem o processo projetual. A análise qualitativa de conteúdo contribuiu para o aprimoramento da categorização e do agrupamento dos critérios que compõem a taxonomia, além de validar a metodologia e a ferramenta desenvolvida: a Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura.

Essa validação interna é importante para a consistência da taxonomia e, conseqüentemente, para embasar as decisões dos projetistas ao longo do processo de fabricação digital. A partir dessas considerações, é possível afirmar que a metodologia e a ferramenta desenvolvidas têm potencial para auxiliar os profissionais envolvidos em processos de projeto que visam a materialização por meio da fabricação digital, contribuindo para uma abordagem mais integrada e eficaz do ciclo de produção.

3.4. Ferramenta | TDFab+Arch

Este item apresenta o modo de utilizar a "Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura" (TDFab+Arch) como ferramenta para catalogar projetos concluídos. Ela é o resultado do desenvolvimento metodológico descrito no capítulo 1 e criada a partir do referencial teórico-conceitual, das etapas de revisões sistemáticas de literatura, análise qualitativa de conteúdo, estruturação da taxonomia e do processo de validação, iniciado neste trabalho.

A TDFab+Arch objetiva servir como um guia para o processo de projeto na fabricação digital, considerando critérios específicos para a materialização no cenário da

arquitetura. Com o intuito de facilitar a colaboração entre os projetistas, a ferramenta está disponível online e pode ser acessado e preenchido por profissionais de diversas áreas, como pode ser visto na Figura 90.

Figura 90 – Acesso a ferramenta



Fonte: Autoria própria

A primeira seção é um sumário que ajuda os projetistas a preencher e navegar pelas informações necessárias. Nessa seção há uma introdução à ferramenta e menu com as cinco seções e subseções da ferramenta, no qual todos os textos estão em inglês, conforme a Figura 91 e Figura 92.

Figura 91 – Sumário – TDFab+Arch

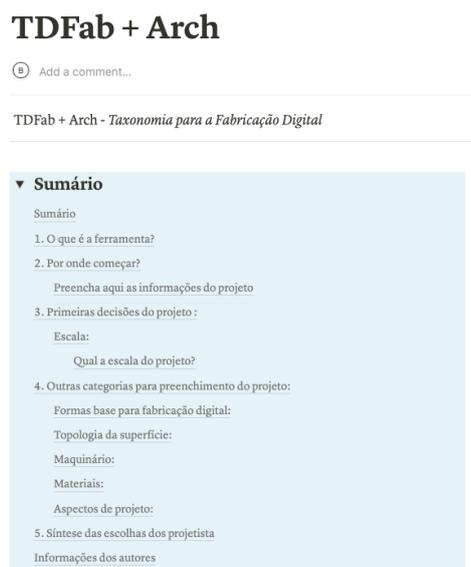


Figura 92 – Tradução do texto

☀ Clique > para abrir a tradução em inglês:
Click > to open the english translation:

☀ Click > to open the english translation:
Clique em > para abrir a tradução em inglês:

Fonte: Autoria própria

O primeiro tópico aborda “o que é a ferramenta?”, nele há a explicação das cinco categorias: materiais, maquinário, topologia das superfícies, formas para fabricação digital e aspectos do projeto, conforme a Figura 93 e o texto: “O processo de fabricação digital apresenta cinco categorias distintas: materiais, maquinário, topologia das superfícies, formas para fabricação digital e aspectos do projeto. Antes de iniciar o projeto, o projetista deve definir a escala de produção. Embora o projetista possa escolher por onde começar, é necessário percorrer todas as outras categorias para completar o ciclo.”

Figura 93 – TDFab+Arch | O que é a ferramenta?

1. O que é a ferramenta?

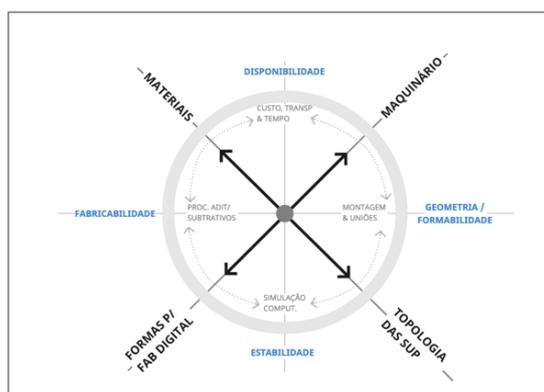
What is this tool?

✳ A ferramenta foi desenvolvida com o intuito de mapear o processo de projeto para a materialização arquitetônica, através da fabricação digital.
The tool was developed to map the design process for architectural materialization through digital fabrication.

O processo de fabricação digital apresenta **cinco** categorias distintas: materiais, maquinário, topologia das superfícies, formas para fabricação digital e aspectos do projeto. Antes de iniciar o projeto, o projetista deve definir a **escala** de produção. Embora o projetista possa escolher por onde começar, é necessário percorrer todas as outras **categorias** para **completar o ciclo**.

► English translation:

! Clique em > para abrir os descritivos:
Click on > to open all the descriptions:



Fonte: Autoria própria

No segundo tópico da ferramenta, intitulado "Por onde começar?", é o momento de iniciar o preenchimento das informações do projeto. Para isso, o usuário deve selecionar o triângulo voltado para baixo “▽” para acessar a tabela e que contém os

campos. Estes incluem "dados sobre catálogo", onde se insere informações sobre a origem do projeto, laboratório ou instituição responsável, nome principal do projeto, autor do projeto e data de início e término. Essas informações são armazenadas em um banco de dados e servem como parâmetros para identificação do projeto (Figura 94).

Figura 94 – TDFab+Arch| Por onde começar?

2. Por onde começar?

What you need to do before starting:

1. **Catálogo:** Para testar a ferramenta, utilizou-se os projetos apresentados no Homo Faber 1.0 e 2.0.
2. **Origem:** onde será realizado o projeto;
3. **Lab / Instituição:** Laboratório e instituição responsável;
4. **Nome do projeto:** Nome do projeto e informações relativas ao estudo;
5. **Autores:** Quem é o responsável pelo experimento;
6. **Data:** A data de início do projeto;
 - a. Clique em **End date** para colocar o intervalo em que o projeto durou e assim completar a duração do projeto

► *English translation:*

! Registre as suas ideias: clique no campo **Nome do Projeto** é possível inserir o resumo, fotos e vídeos que auxiliam no entendimento do projeto

► *English translation:*

! Clique em **>** para abrir os descritivos:

Click on **>** to open all the descriptions:

▼ Preencha aqui as informações do projeto

Table

TDFab + Arch

Fonte: Autoria própria

Ao inserir o “nome do projeto”, uma aba é criada onde é possível adicionar informações específicas sobre o projeto, tais quais: resumo do processo projetual, fotos e vídeos relevantes (Figura 95). Essa inserção é realizada a partir de um *template* elaborado com os títulos dos campos previamente preenchidos para manter o padrão. Essas etapas do preenchimento estão ilustradas nas Figura 96, Figura 97 e Figura 98.

Figura 95 – Template | Seleção

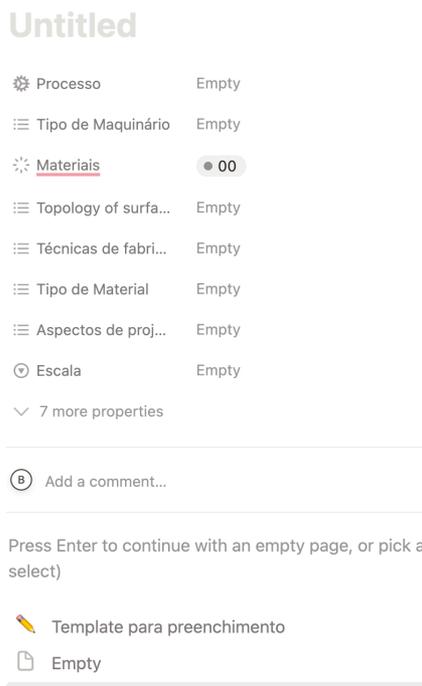


Figura 96 – Template | Informações do projeto



Figura 97 – Template | Resumo

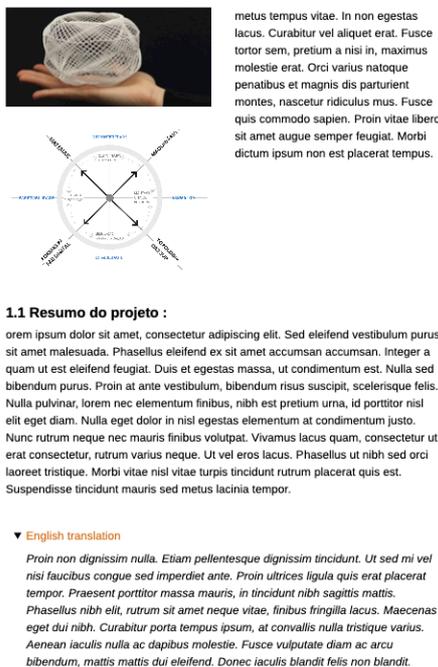
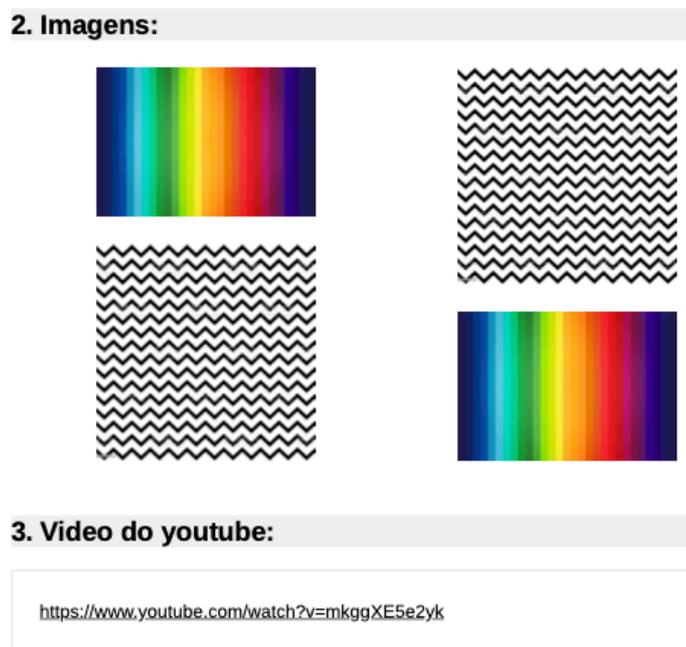


Figura 98 – Template | Imagens e Vídeos

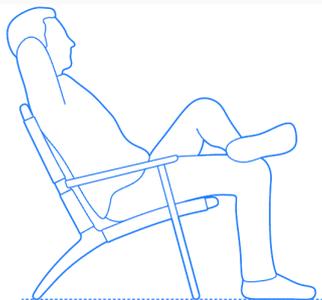


Fonte: Autoria própria

Conforme abordado na construção da taxonomia, o parâmetro de escala é uma decisão que deve ser tomada nas fases iniciais do processo de projeto. A escala influencia na escolha dos materiais, na precisão dos equipamentos e na viabilidade do projeto. Bem como nas proporções e a relação com o ambiente, na capacidade do maquinário utilizado e escolha dos materiais adequados. A definição correta da escala garante a funcionalidade e viabilidade do projeto de fabricação digital.

Desse modo, a seção "3. Primeiras decisões de projeto", o projetista tem que definir a escala do objeto, e a partir disso planejar os próximos passos para o processo de fabricação digital. Nessa seção há opção de quatro escalas, por exemplo a escala pequena engloba objetos com os quais o usuário interage e consegue carregar sozinho, como bancos, cadeiras e elementos de interiores (Figura 99).

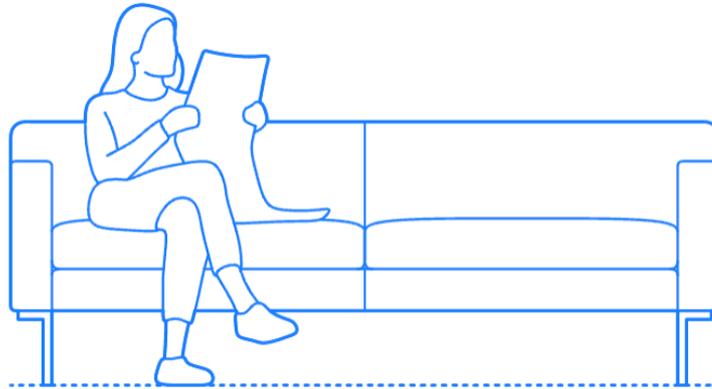
Figura 99 – Escala pequena



Fonte: dimensions.com

A escala média se aplica a objetos com dimensões e pesos maiores, que são difíceis de serem carregados e movimentados com facilidade. Nesse sentido, ao projetar objetos como bancadas, mesas, sofás e poltronas, é fundamental considerar a escala média, uma vez que esses elementos delimitam e organizam o espaço (Figura 100).

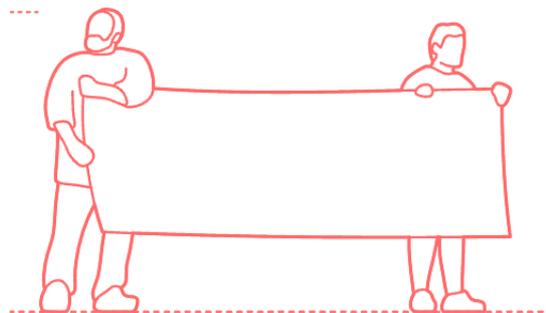
Figura 100 – Escala média



Fonte: dimensions.com

Ao definir a escala do objeto como grande, destaca-se a escolha dos materiais e equipamentos adequados para garantir a qualidade e resistência. Essa escolha deve considerar a capacidade de corte ou impressão de peças de grandes dimensões, bem como a resistência e durabilidade dos materiais escolhidos. Além disso, aspectos relativos a funcionalidade, segurança e resistência do objeto. Na escala grande, estão presentes objetos maiores, que exigem auxílio de uma outra pessoa para serem movidos, como cama de casal, forros, paredes e divisórias (Figura 101).

Figura 101 – Escala grande



Fonte: dimensions.com

A escala extragrande envolve a fabricação de estruturas autônomas de proporções ainda maiores do que a escala grande, que podem ser produzidas por meio de técnicas de fabricação digital, tais quais: pavilhões, edifícios e coberturas. Considera-se aspectos como a infraestrutura para a montagem e erguimento das estruturas, bem como a escolha dos materiais e técnicas de fabricação adequados para garantir a qualidade, resistência e durabilidade necessárias (Figura 102).

Figura 102 – Escala extragrande



Fonte: <https://retokommerling.com/metrosol-parasol-sevilla/>

Contudo, a ferramenta da Taxonomia para Fabricação Digital proporciona uma abordagem simplificada para a definição da escala adequada na produção de objetos. Por meio de uma escolha simples, o usuário pode selecionar a escala desejada para o objeto a ser fabricado, tendo como opções: pequena, média, grande e extragrande, conforme ilustrado na Figura 103. Essa funcionalidade permite ao projetista considerar as dimensões e proporções ideais para o objeto que facilita o processo de tomada de decisão, contribuindo para a eficácia do projeto de fabricação digital.

Figura 103 – TDFab+Arch | Escala

3. Primeiras decisões do projeto :

Escala:

| Geralmente, é possível determinar o tamanho do objeto a ser construído antes de iniciar um projeto, o que permite selecionar a escala arquitetônica adequada para o estudo.

▼ Qual a escala do projeto?

- **Pequena** | objetos que o usuário consegue carregar sozinho, tais quais: cadeiras, banco ou banquetas.
- **Média** | Objetos pesado e difícil de carregar, tais quais bancadas, mesas, sofás e poltronas
- **Grande** | objetos grandes e pesados no qual é necessário outra pessoa para carregar, tais quais: cama de casal, forros, paredes ou divisórias.
- **Extra Grande** | Estruturas autônomas que cobrem o usuário como edifícios, coberturas e pavilhões .

Table

TDFab + Arch

Fonte: Autoria própria

Na quarta seção do projeto, intitulada "Outras categorias para preenchimento do projeto", é iniciada a seleção dos critérios a serem aplicados na fabricação digital. Nessa seção, é apresentado um resumo das cinco categorias discutidas neste trabalho: formas para fabricação digital, topologia de superfície, maquinário, materiais e aspectos de projeto. Cada uma dessas categorias pode ser acessada e preenchida de forma independente, através da seleção do triângulo ▽ na tabela da ferramenta TDFab+Arch, conforme ilustrado na Figura 104. Sendo um processo no qual o projetista escolhe, a partir das decisões prévias sobre o elemento. Essa seção permite ao usuário definir e detalhar as características e especificações relacionadas a cada uma das categorias mencionadas. Ao preencher essas informações, o projetista estabelece parâmetros importantes que orientarão o planejamento e a execução da fabricação digital,

contribuindo para a obtenção de resultados precisos e alinhados com os objetivos do projeto.

Figura 104 – TDFab+Arch | Categorias

4. Outras categorias para preenchimento do projeto:

Other categories that must be filled in for the project:

! Clique em > para abrir os descritivos:
Click on > to open all the descriptions:

- ▶ Formas base para fabricação digital:
- ▶ Topologia da superfície:
- ▶ Maquinário:
- ▶ Materiais:
- ▶ Aspectos de projeto:

Categories with descriptions
Tables for filling in all the information

Fonte: Autoria própria

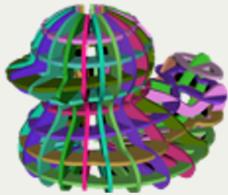
Dentro desta seção, encontra-se a subseção de "formas para fabricação digital", a qual resume as técnicas de fabricação digital discutidas no item 3.2 (conforme ilustrado na Figura 105). Nessa subseção, é disponibilizada uma tabela para que o projetista possa preencher a categoria utilizada entre diferentes opções: planos seriados, tesselação, conformação e dobra. Ressalta-se que um mesmo objeto pode incorporar uma ou várias técnicas de fabricação digital (conforme exemplificado na Figura 106). Essa subseção permite o projetista compreender as diversas abordagens para a criação de formas e ao preencher a tabela, o projetista auxilia nas diretrizes projetuais para a fabricação do objeto.

Figura 105 – TDFab+Arch | Formas para fabricação digital

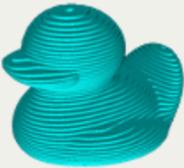
- Planos Seriados / Sectioning / Hashing / Stack / Countour

As técnicas de fabricação digital simplificam o processo de construir elementos complexos ou com formas curvilíneas. Com essas técnicas é possível transformar 3D em formas 2d capazes de serem materializadas em planos seriados, o que facilita o processo de fabricação em máquinas de corte à laser ou em fresadoras.

Hashing



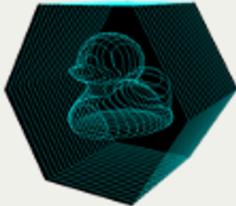
Empilhamento (ou stack)



Planos Seriados



Contorno (ou countour)



- + :: • Tesselação (tesselation) / Modulation / plate

As técnicas simplifica padrões geométricos bidimensionais ou tridimensionais que podem ser aplicados em elementos ou na envoltória da edificação. Esses padrões podem ser modulares ou com peças de quebra-cabeça. As planificações ou a modelagem auxiliam no processo de execução, facilitam na redução do tempo e na aplicabilidade dos materiais.

Tesselação (tesselation)

Plate

Modulação

Figura 106 – TDFab+Arch | Tabela para Fabricação Digital

Ciclo da fabricação digital

☑ Catálogo	Aa Nome do Projeto	☰ Técnicas de fabricação digital
Homo Faber 1.0	EXPANDIBLE TESSALATIONS	Tesselação
Homo Faber 1.0	HIGH PERFORMANCE FACADE SYSTEMS	Tesselação Conformação
Homo Faber 2.0	LEAF BRICK	Tesselação
Homo Faber 2.0	DIESTE PAVILION	Dobra
Homo Faber 2.0	ALADA	Dobra
Homo Faber 2.0	ARTISANAL DIGITAL TILE FABRICATION	Conformação Tesselação
Homo Faber 2.0	360° FURNITURE	Planos Seriados

Fonte: Autoria própria

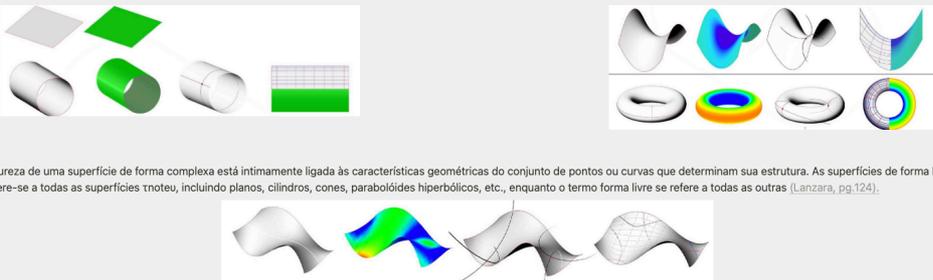
A segunda subseção aborda a categoria "topologia das superfícies" na fabricação digital. Nessa categoria, são resumidos os tipos de superfícies que as geometrias podem apresentar, como dupla curvatura, forma simples ou forma livre. Assim como na categoria anterior, nessa subseção também há uma tabela na qual o projetista pode preencher com base em suas decisões (conforme a Figura 107). Essa categoria é de extrema importância na fabricação digital, pois permite ao projetista entender as diferentes formas e geometrias, resultando em projetos mais criativos e inovadores. Através do preenchimento da tabela, o projetista pode especificar a topologia desejada, o que facilita a orientação para a fabricação do objeto.

Figura 107 – TDFab+Arch | Topologia da superfície

▼ Topologia da superfície:

| A superfície da geometria depende de uma forma para ser materializada, seja ela uma curva, plano ou uma forma livre, escolha-se aqui a superfície predominante

- **Forma Simples** - Superfície com um plano ou 1 curva, seja cilíndrico ou reto. Exemplo de uma superfície com curvatura gaussiana positivo (elipsóide), negativo (parabolóide) e nulo (superfície plana) (Lanzara, pg. 122).
- **Dupla Curvatura** - A curvatura é sempre na mesma linha e em ambas as direções principais, em cada ponto há uma curvatura positiva em uma direção e uma negativa na outra (Lanzara, pg. 135).
- **Forma livre** - A natureza de uma superfície de forma complexa está intimamente ligada às características geométricas do conjunto de pontos ou curvas que determinam sua estrutura. As superfícies de forma livre escapam às rígidas regras e refere-se a todas as superfícies tótopes, incluindo planos, cilindros, cones, parabolóides hiperbólicos, etc., enquanto o termo forma livre se refere a todas as outras (Lanzara, pg.124).



Table

Ciclo da fabricação digital

Nome do Projeto	Autores	Topologia das superfícies
LEAF BRICK	NEXUS	Curva simples Dupla curva
DIESTE PAVILION	LABFAB MVD	Dupla curvatura
HIGH PERFORMANCE FACADE SYSTEMS	Frontis3D	Curva simples
EXPANDIBLE TESSALATIONS	Patricia Muñoz e equipe	Curva simples
Casa Nordestinha [Jato de água]	Bárbara e Carlos Nome	Curva simples

Fonte: Autoria própria

A terceira subseção aborda o maquinário utilizado na fabricação digital, incluindo os processos aditivos e subtrativos. É discutido sobre os equipamentos específicos utilizados nesses processos. A tabela disponível na ferramenta permite ao projetista inserir informações sobre o processo aplicado (aditivo, subtrativo ou ambos) e os

maquinários utilizados. Imagens e exemplos são fornecidos para auxiliar na compreensão e classificação dos objetos, conforme a Figura 108 e Figura 109. Essa subseção é essencial para a compreensão dos aspectos técnicos e práticos da fabricação digital, contribuindo para a escolha adequada dos equipamentos e processos na realização dos projetos.

Figura 108 – TDFab+Arch | Maquinário

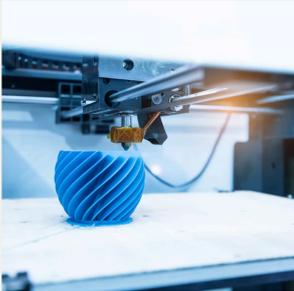
▼ **Maquinário:**

*Em maquinário, escolhe-se quais processo de fabricação foram utilizados: **subtrativos** (forma é obtida a partir da subtração do material) ou **aditivos** no qual há a deposição do material para materializar a forma.*

Ainda nessa opção, é possível escolher uma máquina ou adicionar um novo método de fabricação (múltipla escolha ou adicionar novos elementos).

▼ **Processos aditivos**

- Impressora.3d



▼ **Processos subtrativos**

- Corte à plasma



- Robôs



- Fresadora CNC



- Cortadora à laser



Fonte: Autoria própria

Figura 109 – TDFab+Arch | Tabela dos processos aditivos e subtrativos

Aa Nome do Projeto	⚙️ Processo	☰ Tipo de Maquinário	+
📄 Casa Nordestinha [Jato de água]	Proc. Subtrativos	Corte à plasma	
🏠 Casa Nordestinha [Impressora 3d FDM]	Proc. Aditivos	Impressora 3D	
📄 XIII ARCHITECTURE COMPETITION MADEIR	Proc. Subtrativos	Corte à laser Fresadora CNC	Robôs
📄 Casa Nordestinha	Proc. Subtrativos	Fresadora CNC	
📄 LEAF BRICK	Proc. Aditivos	Impressora 3D	
📄 DIESTE PAVILION	Proc. Subtrativos	Fresadora CNC	
📄 ALADA	Proc. Subtrativos	Fresadora CNC	
📄 360° FURNITURE	Proc. Aditivos	Impressora 3D	
📄 ARTISANAL DIGITAL TILE FABRICATION	Proc. Aditivos	Impressora 3D	

Fonte: Autoria própria

A quarta subseção aborda os materiais utilizados na fabricação digital e discute como esses materiais são incorporados aos projetos. Nessa seção, são apresentadas duas categorias para preenchimento: a predominância de material empregado no elemento e os tipos de materiais utilizados. A primeira categoria refere-se à predominância de material utilizado no projeto. Existem duas opções de escolha: "monomaterial" quando apenas um tipo de material é utilizado em todo o projeto e "multimaterial" significa que vários materiais distintos são utilizados em sua totalidade.

Além disso, são listados os tipos de materiais mais comumente utilizados na fabricação digital, como madeira, concreto, plástico, metal, entre outros. O preenchimento dessa categoria permite selecionar múltiplas opções, indicando quais materiais foram utilizados no projeto em questão. Essas informações sobre a caracterização dos materiais utilizados são relevantes para compreender a composição e a diversidade dos projetos de fabricação digital, ver Figura 110.

Figura 110 – TDFab+Arch | Tabela de Materiais

▼ **Materiais:**

O material define como será materializado. Assim, primeiramente é possível definir se o projeto é feito apenas com um material (monomaterial, multimaterial ou híbrido) e quais materiais utilizados de forma majoritária na materialização do projeto. Nessa opção é possível escolher um ou mais materiais e, ainda adicionar um novo (múltipla escolha).

1. **Totalidade do material utilizado:**

- **Monomaterial** - Apenas um material é utilizado no projeto;
 - Exemplo: uma projeto inteiramente feito em madeira até os conectores.
- **Multimaterial** - São utilizados vários materiais no mesmo projeto ou em testes de diversos materiais;
 - Exemplo: uma projeto inteiramente feito em madeira, outro em metal, em acrílico...

2. **Após isso, escolha-se os materiais utilizados nesse processo:**

*nesse caso, não é necessário incluir o material dos conectores, caso Híbrido seja escolhido.

- Concreto
- Poliestireno
- Acrílico
- Compensado de madeira
- Bio materiais: cob, palha, adobe
- Metal
- Filamento PLA
- Filamento FDM

Table

Ciclo da fabricação digital

Catálogo: Homó Faber 1.0...

Nome do Projeto	Materiais	Tipo de Material	
LEAF BRICK	Monomaterial	Filamento PLA	Biomateriais
DIESTE PAVILION	Multimaterial	Compensado	
ALADA	Monomaterial	Compensado	
360° FURNITURE	Multimaterial	Filamento PLA	Compensado
ARTISANAL DIGITAL TILE FABRICATION	Monomaterial	Biomateriais	
VIAJES ROSARIO BOUTIQUE TRAVEL AGENCY	Monomaterial	Compensado	

Fonte: Autoria própria

Ao concluir todas as etapas da ferramenta da TDFab+Arch, o usuário será apresentado a uma seção de síntese contendo todas as informações coletadas e preenchidas durante o processo. Nessa seção, há quatro opções de visualização disponíveis: tabela, galeria, linha do tempo e lista (Figura 111), cada uma com suas próprias vantagens e utilidades. Além disso, a seção conta com filtros entre todos os parâmetros preenchidos até aqui, como: catálogo, origem, data, escala, formas para fabricação digital, topologia de superfície, maquinário, materiais e aspectos de projeto. Essas opções são ilustradas na e visam fornecer uma visão geral clara e organizada do projeto para o usuário.

O modo de visualização da TDFab+Arch abaixo está em forma de galeria que auxilia na exibição de elementos, como imagens e vídeos. Ela oferece uma exibição em miniaturas, permitindo que o usuário navegue pelos projetos a partir das imagens.

Figura 111 – Síntese da TDFab+Arch e visualização em galeria

5. Síntese das escolhas dos projetista

Summary of the designers' choices

Abaixo a tabela com todos os critérios utilizados no projeto e o resultado das escolhas dos projetistas no processo de projeto.
É possível observar em formato de lista, tabela, galeria ou timeline com todas as categorias.
► [English translation](#)

Formas de visualização → Table Gallery Timeline List

Filtros para facilitar a busca → Ciclo da fabricação digital

Catálogo Escala Origem Tipo de Material Topology of surface Materiais Aspectos de projeto

Resumo de cada projeto com categorias, critérios e imagem

<p>DESIGN DE PRECISÃO Homo Faber 1.0 Brasil LED / UFC Daniel Ribeiro Cardoso e equipe Pequena Proc. Substrativos Corte à laser Monomaterial Acrílico Tesselação Curva simples</p>	<p>CoBLOgô Homo Faber 1.0 Brasil SUB'N Franklin Lee e equipe Extra grande Proc. Substrativos Fresadora CNC Monomaterial Concreto Compensado Conformação Forma livre</p>	<p>HIGH PERFORMANCE FACADE SYSTEMS Homo Faber 1.0 Colômbia Frontis 3D Frontis3D Mídia Proc. Substrativos Fresadora CNC Corte à laser Monomaterial Metal Compensado Tesselação Conformação</p>	<p>EXPANDIBLE TESSALATIONS Homo Faber 1.0 Argentina IEHU - FADU / UBA Patricia Muñoz e equipe Pequena Proc. Substrativos Corte à laser Multimaterial Borracha Compensado Tesselação</p>	<p>E-LAMPS Homo Faber 1.0 Brasil Rede Brasileira de Fabricação Digital Afonso Orcivali e equipe Pequena Proc. Substrativos Corte à laser Impressora 3D Multimaterial Compensado Espuma Papelão Planos Seriatos Curva simples</p>	<p>DOBRÁ Homo Faber 1.0 Brasil Protobox Wilson Barbosa Neto, Renata La Rocca Pequena Proc. Substrativos Corte à plasma Monomaterial Metal Planos Seriatos Curva simples</p>
--	--	--	--	---	--

Fonte: Autoria própria

A visualização em forma de tabela é uma das mais comum e utilizada. Ela apresenta os dados em formato tabular, com linhas e colunas, permitindo uma visão estruturada e comparativa das informações. A tabela exhibe os dados catalogados e filtros para facilitar a busca e classificação, conforme a Figura 112.

Figura 112 – TDFab+Arch | Visualização em tabela

Catálogo	Origem	Lab/ Instituição	Autores	Nome do Projeto	Escala	Tipo de Ma...	Técnicas de ...	Topology of sur...	Materials	Tipo de Material
Homo Faber 2.0	Brasil	NEXUS e UFPB	NEXUS	LEAF BRICK	Pequena	Impressora 3D	Tesselação	Curva simples Dupla curvatura	Monomaterial	Filamento PLA Biomateriais
Homo Faber 2.0	Uruguaia	LABFAB MVD	LABFAB MVD	DIESTE PAVILION	Extra grand	Fresadora CNC	Dobra	Dupla curvatura	Multimaterial	Compensado
Homo Faber 2.0	Argentina	IDLAB + TAMACO-CHELA	IDLAB + TAMACO-CHELA	ALADA	Grande	Fresadora CNC	Dobra	Curva simples Forma livre	Monomaterial	Compensado
Homo Faber 2.0	Brasil	EDRO 3D	Edro e Rafael Studart	360° FURNITURE	Pequena	Impressora 3D	Planos Seriados	Curva simples	Multimaterial	Filamento PLA Compensado
Homo Faber 2.0	Colômbia	LABORATORIO DE FABRICACIÓN DIGITAL - UPC	LABORATORIO DE FABRICACIÓN DIGITAL - UPC	ARTISANAL DIGITAL T	Pequena	Impressora 3D	Conformação Tesselação	Dupla curvatura	Monomaterial	Biomateriais
Homo Faber 2.0	Peru	DESSIN TECHNISCH	DESSIN TECHNISCH	VIAJES ROSARIO BOU	Grande	Fresadora CNC	Planos Seriados	Dupla curvatura	Monomaterial	Compensado

Fonte: Autoria própria

A visualização em forma de lista é uma opção mais simplificada e linear. Ela apresenta informações em formato de texto, com a lista dos critérios selecionados anteriormente. A lista permite acompanhar as informações de forma sequencial, conforme a Figura 113.

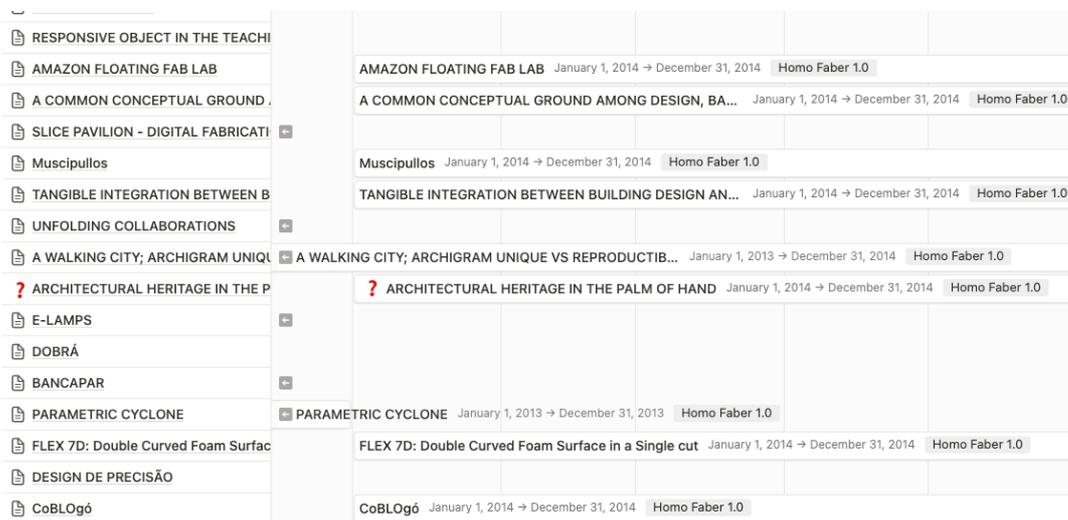
Figura 113 – TDFab+Arch | Visualização do tipo lista

Nome do Projeto	Data	Autores	Origem	Material
EXPANDIBLE TESSALATIONS	Jan 1 → Dec 31, 2014	Patricia Muñoz e equipe	Argentina	Homo Faber 1.0
DIESTE PAVILION	Jan 1 → Dec 31, 2017	LABFAB MVD	Uruguaia	Homo Faber 2.0
360° FURNITURE	Jan 1 → Dec 31, 2017	Edro e Rafael Studart	Brasil	Homo Faber 2.0
LOUNGE FOR BRAZILIAN VENTURE CAPITAL FIRM	Jan 1 → Dec 31, 2017	SUBDV ARCHITECTURE A...	Brasil	Homo Faber 2.0
MAKER HOME	Jan 1 → Dec 31, 2017	TU TALLER DESIGN	Colômbia	Homo Faber 2.0
GENERAL FACADE, SQUARE 85 PROJECT	Aug 1, 2017 → Jul 31, 2018	FRONTIS 3D	Colômbia	Homo Faber 2.0
XIII ARCHITECTURE COMPETITION MADERA21	Jan 1 → Jul 31, 2018	CREATIVE ROBOTICS / U...	Chile	Homo Faber 2.0
NORTHEAST HOUSE 1.0	Jan 13, 2017 → Dec 31, 2018	LM + P / UFPB	Brasil	Homo Faber 2.0
DISCRETE STRUCTURES	Jan 1 → Dec 31, 2017	Francisco Calvo e equipe	Chile	Homo Faber 2.0
COASTAL FOG TOWER	Jan 1 → Dec 31, 2016	Alberto Fernández e Susa...	Chile	Homo Faber 2.0
FORM(A)CTIVITY II	Jan 1 → Dec 31, 2017	GRUPO DE PESQUISA EM...	Brasil	Homo Faber 2.0
ATTRACTORS AND VORONOI	Jan 1 → Dec 31, 2017	UPC - Universidad Peruan...	Peru	Homo Faber 2.0
COMPUTATIONAL RESILIENT DESIGN PROCESSES	Jan 1 → Dec 31, 2017	UPC - Universidad Peruan...	Peru	Homo Faber 2.0

Fonte: Autoria própria

A visualização em linha do tempo é permite acompanhar o progresso e o desenvolvimento dos projetos ao longo do tempo. Ela auxilia na comparação dos projetos visualmente, colocando-os lado a lado. Isso ajuda a identificar a duração de cada projeto, desde o início até a conclusão. Essa visualização facilita a análise comparativa, permitindo avaliar o desempenho, a eficácia e o tempo necessário para a conclusão de cada projeto, conforme exemplificado na Figura 114.

Figura 114 – TDFab+Arch | Visualização do tipo linha do tempo



Fonte: Autoria própria

3.5. Considerações sobre o capítulo

Neste capítulo, foram abordados diversos aspectos relacionados à metodologia de pesquisa utilizada, incluindo a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), a análise qualitativa de conteúdo, a estruturação e o uso da Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch). Através dessas abordagens, foi possível obter

ideias para promover avanços na área da fabricação digital.

As revisões sistemáticas de literatura foram fundamentais para a compreensão do estado atual do conhecimento, permitindo a identificação de estudos e a síntese das principais contribuições. Essa etapa permitiu embasar teoricamente a pesquisa, identificar e refinar qual é a lacuna da pesquisa e desenvolver a taxonomia.

A análise qualitativa de conteúdo possibilitou uma investigação mais aprofundada dos artigos coletados pela RSL2, através da codificação realizada pela TDFab+Arch. Essa análise permitiu uma compreensão mais abrangente dos conceitos relacionados à fabricação digital, bem como das necessidades e desafios enfrentados pelos projetistas.

A estruturação da taxonomia foi uma etapa fundamental para organizar e categorizar os elementos essenciais da fabricação digital. A taxonomia permitiu a sistematização das diferentes técnicas, materiais, equipamentos e aspectos de projeto envolvidos no processo. Essa estruturação contribuiu para uma compreensão mais clara e sistemática, facilitando a aplicação da TDFab+Arch e o desenvolvimento de projetos de fabricação digital. A ferramenta foi o resultado do desenvolvimento e integração de todos os elementos discutidos neste capítulo.

A TDFab+Arch auxilia no processo de projeto e pode ser utilizada como guia desde a concepção do projeto até a sua materialização ou ainda como ferramenta para classificar projetos de fabricação digital. No entanto, o nome da ferramenta sugere a ênfase no âmbito da arquitetura, mas isso não limita atuação só a esse cenário.

Os tipos de visualização disponíveis na Taxonomia para Fabricação Digital oferecem ao projetista diferentes maneiras de visualizar e explorar os critérios inseridos na ferramenta. É importante destacar que o projetista não está restrito a escolher apenas um tipo de visualização, mas pode alternar entre eles conforme necessário. Cada

visualização tem suas vantagens específicas e contribui para a compreensão e organização dos critérios.

A flexibilidade da ferramenta e a possibilidade da aplicação de filtros permite que os usuários escolham a visualização que melhor atenda às suas preferências e necessidades em cada momento. Essa possibilidade contribui para a interatividade da ferramenta, permitindo que o projetista explore os critérios de diferentes perspectivas e tenha uma compreensão mais abrangente dos projetos. Sendo, a Taxonomia para Fabricação Digital uma ferramenta adaptável e personalizável, permitindo que os usuários escolham a visualização mais adequada para suas necessidades em cada momento.

4. APLICAÇÃO DA TAXONOMIA PARA FABRICAÇÃO DIGITAL

Este capítulo, são abordados os experimentos que compõem o início do processo de validação externa da Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch). A taxonomia foi aplicada no processo de projeto da Casa Nordestinha (CN) para a materialização arquitetônica, além de ser utilizada como ferramenta para classificar os projetos do catálogo do Homo Faber (HF). Portanto, discute-se neste capítulo a aplicação desses experimentos e os resultados obtidos.

O processo de validação externa envolveu a aplicação da TDFab+Arch sob duas óticas e com circunstâncias distintas; a primeira na fabricação do mesmo projeto em máquinas distintas com materiais diversos conduzidos no Laboratório de Modelos + Prototipagem (LM+P) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB / BR) e nos laboratórios de fabricação digital do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT / EUA). Em seguida,

aplicou-se a ferramenta como meio de catalogar os projetos nos projetos materializados e que compõem as edições do Homo Faber 1.0 e Homo Faber 2.0.

A aplicação da TDFab+Arch objetivou avaliar a eficácia e viabilidade em cenários reais, tanto no processo de projeto quanto na classificação de projetos materializados. Essa análise permitiu compreender e refinar a aplicabilidade da metodologia, identificar possíveis melhorias e adaptá-la para atender diferentes necessidades e contextos. Com isso, a Taxonomia para Fabricação Digital se estabelece como uma ferramenta flexível e versátil, que pode contribuir para a otimização do processo projetual da fabricação digital e para catalogação de projetos.

4.1. Experimentos – Casa Nordestinha

Os experimentos dissertados nesse item pertencem a primeira fase da validação externa (4.VE), sendo a quarta etapa do processo de validação como um todo (item 1.3). Essa etapa responde ao objetivo específico IV que é alcançada mediante a etapa D da abordagem metodológica.

No processo de validação externa, utilizou-se o projeto da "Casa Nordestinha" (CN) para o uso da Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch). Dessa maneira, a TDFab+Arch foi utilizado como guia para o processo de fabricação da CN em três tipos de máquina e diversos materiais, para fins de experimentação.

A CN é a versão reduzida do projeto Casa Nordeste 1.0 (2020), no qual foi desenvolvido para o Solar Decathlon América Latina e Caribe no ano de 2019. A Casa Nordeste é um projeto arquitetônico para a região nordeste do Brasil, projetada com

base nas características culturais, climáticas e ambientais locais. Este projeto teve como objetivo ser uma habitação energeticamente autossuficiente, utilizando tecnologias solares e soluções sustentáveis. Além disso, a equipe do LM+P / UFPB, considerou aspectos relacionados à funcionalidade, conforto e estética.

A Casa Nordeste foi idealizada para ser construída a partir de materiais disponíveis no mercado local e submetida a processos subtrativos com a fresadora. Esse projeto contribuiu para o desenvolvimento de soluções arquitetônicas e serviu como exploração projetual para construções de baixo impacto ambiental na região nordeste do Brasil. Por ter suas etapas bem detalhadas, a Casa Nordestinha foi escolhida como estudo de caso para a aplicação prática da TDFab+Arch.

Através da realização de experimentos em três diferentes máquinas - fresadora de CNC, cortadora com jato de água e impressora 3D - utilizando a TDFab+Arch como guia para o processo projetual, foi possível compreender como os critérios auxiliaram na orientação da fabricação em diversos cenários.

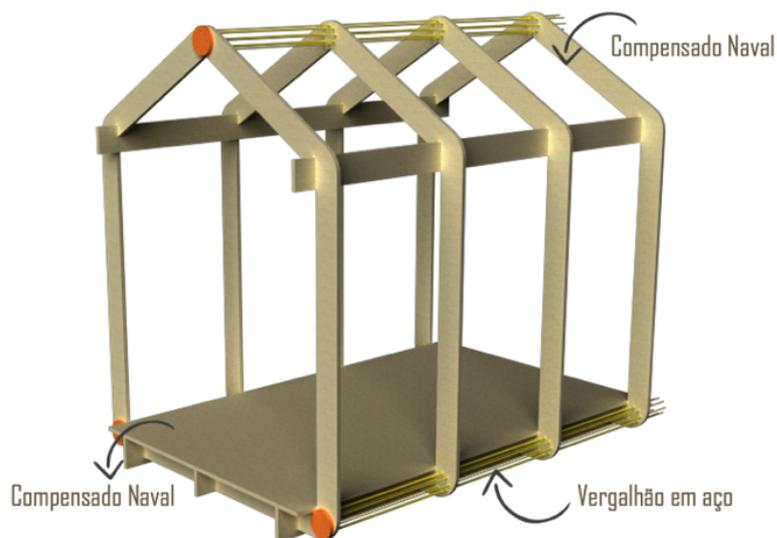
Os critérios utilizados na taxonomia pelos experimentos foram representados com setas vermelhas. Essa ilustração demonstra a interação entre os projetos e os critérios estabelecidos, bem como o modo que foram abordados no decorrer do projeto. Os protótipos descritos possuem fotos, vídeos e *qr code* para acesso do projeto à TDFab+Arch. Essa análise permitiu compreender e refinar a aplicação da TDFab+Arch, a partir da aplicação cíclica em projetos de fabricação digital.

4.1.1. CN | Fresadora em CNC

O protótipo da Casa Nordestinha foi projetado para ser uma casa na árvore para uma criança produzido em uma escala 1:1. O projeto foi concebido a partir de processos paramétricos, que envolvem a base das dimensões do compensado naval para a modulação nos pórticos.

Os pórticos foram espaçados a cada 2 metros e reforçados na horizontal com vigas de compensado no travamento superior. Para estruturar os pórticos, foram postos travamentos em aço na parte superior e nos limites dos pórticos para suporte das telhas. O projeto foi modelado no *software* Rhinoceros 3D e realizada as simulações computacionais de estrutura no Karamba3D, que permitiu adicionar as propriedades específicas dos materiais, como aço e compensado naval, em cada elemento da estrutura (Figura 115).

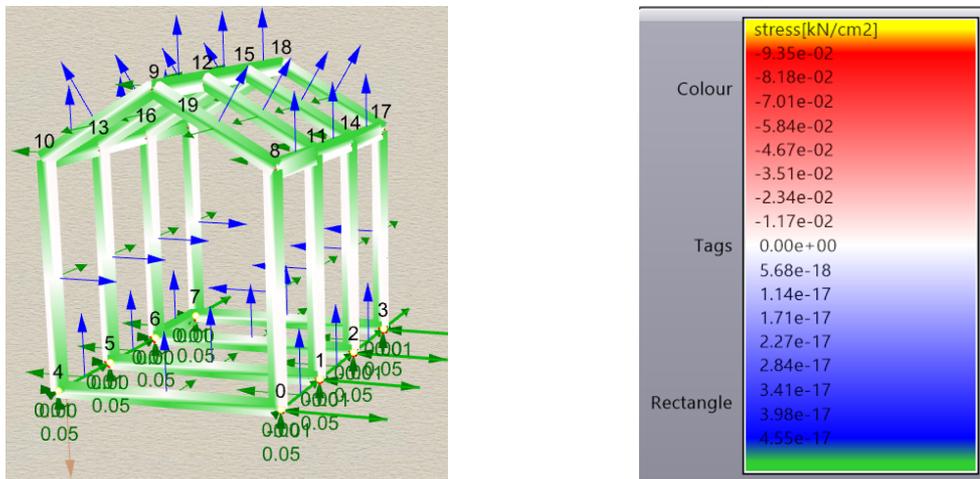
Figura 115 – Modelo de Casa Nordestinha



Fonte: Autoria própria

A fabricação do módulo foi baseada em simulação estrutural e a análise foi realizada para garantir a eficácia da estrutura. A visualização do modelo apresenta as reações das forças por meio das setas azuis e verdes, e a legenda representa as forças em kN/cm^2 que atuam no modelo. Além de auxiliar no entendimento do modelo, a simulação estrutural também minimiza erros na fabricação e possibilita a construção do módulo (Figura 116).

Figura 116 – Simulação computacional



Fonte: Autoria própria

O projeto foi desenvolvido no laboratório da UFPB utilizando a fresadora em CNC e placas de compensado naval (2,20m x 1,60m e 18mm de espessura). Como não havia disponibilidade local, as placas foram adquiridas em Natal/RN e transportadas em um carro comum, o que impactou o custo e o tempo de fabricação (Figura 117).

Figura 117 – Fresadora cortando as placas de compensado naval



Fonte: Arquivo pessoal

O projeto da Casa Nordestinha utiliza técnicas de fabricação digital de planos seriados com maquinário de fresadora CNC (processos subtrativos), utilizando materiais de compensado naval com superfície de curva simples (topologia de superfície) em escala grande (Figura 118 e Figura 119).

Figura 118 – Montagem das peças



Figura 119 – Protótipo fabricado



Fonte: Arquivo pessoal

Os aspectos projetuais considerados incluíram a parametrização e o plano de corte (eixo de passo, conforma as Figura 118 e Figura 119), preocupações com resíduos, custo, tempo e transporte, além de simulação computacional para desempenho estrutural e estabilidade. Houve também atenção especial às uniões, que foram feitas de forma híbrida (Figura 121), utilizando parafusos para facilitar a montagem e desmontagem.

Figura 120 – Eixo de passo



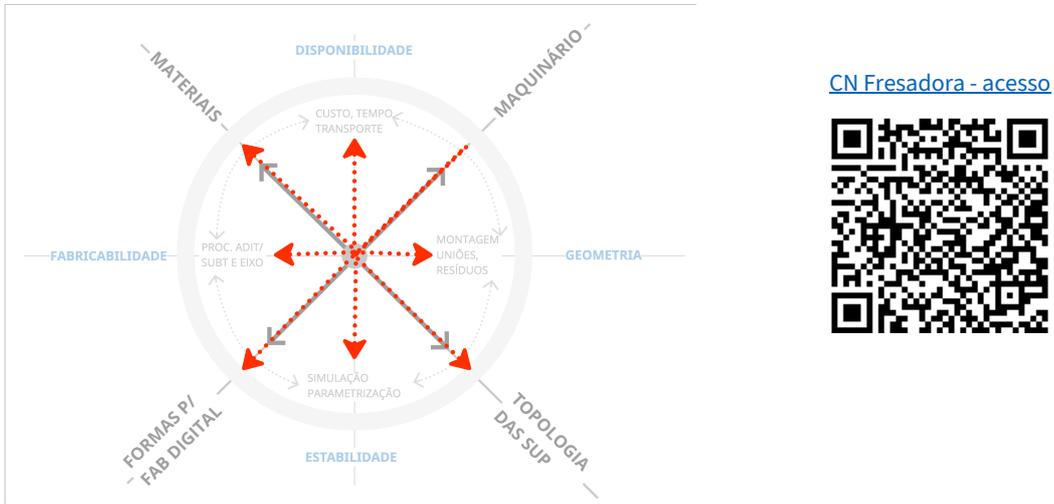
Figura 121 – Uniões



Fonte: Arquivo pessoal

O processo projetual da Casa Nordestinha foi conduzido com base no maquinário disponível, a fresadora CNC, levando em consideração também as restrições de transporte, de modo que o projeto pudesse ser acomodado em um carro comum. A seleção do material apropriado para a fabricação foi uma etapa importante para o processo. Além disso, simulações computacionais foram realizadas para avaliar o desempenho estrutural e ambiental, bem como para otimizar a forma e os encaixes das peças, conforme demonstrado nas representações gráficas da TDFab+Arch (Figura 122).

Figura 122 – TDFab+Arch | CN Fresadora



Fonte: Autoria própria

A síntese do projeto da Casa Nordestinha aplicada na Taxonomia para Fabricação Digital com todas as categorias e critérios utilizados, conforme a Figura 123.

Figura 123 – Síntese na TDFab+Arch



Casa Nordestinha

Brasil

UFPB

Grande

Proc. Subtrativos

Fresadora CNC

Monomaterial

Compensado

Planos Seriados

Curva simples

Uniões híbridas Estabilidade R

Casa Nordestinha

- 📍 Origem: Brasil
- 🏢 Lab/ Instituição: UFPB
- ⚙️ Processo: Proc. Subtrativos
- 🔧 Tipo de Maquiná...: Fresadora CNC
- 🌟 Materiais: Monomaterial
- 📏 Tipo de Material: Compensado
- 📐 Topology of surf...: Curva simples
- 🔧 Técnicas de fabri...: Planos Seriados
- 👁️ Aspectos de proj...: Uniões híbridas Estabilidade Resíduo
Tempo Montagem Transporte Custo
Parametrização / BIM Desempenho/Simulação
- 📏 Escala: Grande

Fonte: Autoria própria

4.1.2. CN | Cortadora com jato de água

O protótipo foi fabricado com o uso de uma cortadora a jato de água, que cortou peças de metal na escala 1:150, sendo o mesmo processo de fabricação subtrativa do experimento anterior (Figura 124 e Figura 125). Na cortadora à jato d'água necessita ter atenção no eixo de passo – ordem de cortar as peças de máquinas (Figura 126) e o tamanho das peças tem que obedecer a largura da plataforma de corte.

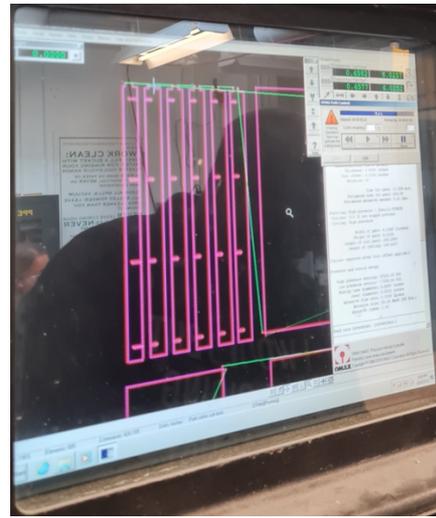
Figura 124 – Placa de metal no maquinário



Figura 125 – Início do corte



Figura 126 – Eixo de passo



Fonte: Acervo pessoal

Durante a produção do protótipo, as peças foram cortadas gradualmente na máquina para evitar deslizamentos entre as frestas (Figura 127). Para garantir o encaixe preciso entre as estruturas, o espaçamento foi ajustado para a espessura do metal, utilizando a parametrização para assegurar a estabilidade das peças (Figura 128).

Figura 127 – Peças em metal

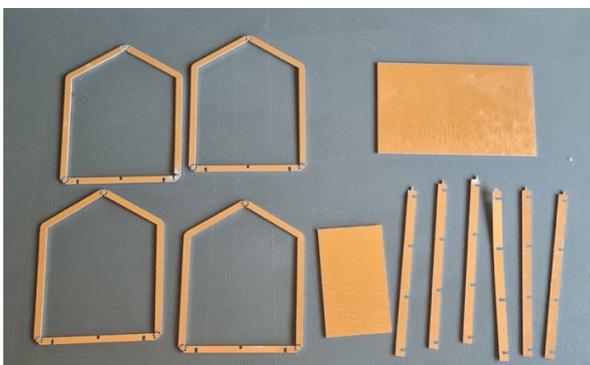


Figura 128 – Protótipo em metal



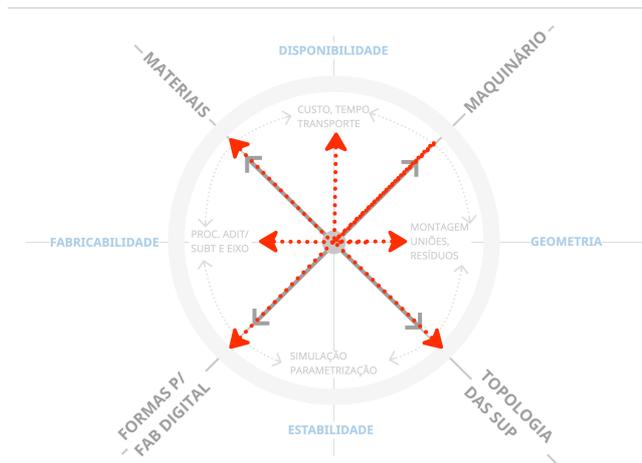
Fonte: Acervo pessoal

O protótipo fabricado com o uso da cortadora a jato de água apresentou resultados satisfatórios no contexto do processo de fabricação subtrativa. A escala de 1:150 permitiu a produção de peças de metal com precisão e detalhes adequados. Durante a fabricação, foram considerados alguns pontos importantes, como a atenção ao eixo de passo para determinar a ordem de corte das peças e a necessidade de adequar o tamanho das peças à largura da plataforma de corte. Além disso, foram adotadas medidas para evitar deslizamentos entre as frestas, realizando o corte gradual das peças na máquina. O encaixe entre as estruturas foi garantido por meio do ajuste do espaçamento para a espessura do metal, utilizando a parametrização como estratégia para assegurar a estabilidade das peças.

Contudo, ao representar o processo projetual da Casa Nordestinha na TDFab+Arch, é possível observar a centralidade do maquinário na abordagem. A intenção era explorar as capacidades do equipamento, e para isso, foi necessário compreender como o projeto poderia ser adaptado às dimensões das placas de metal disponíveis, o que influenciou a espessura das peças e a estabilidade delas.

As uniões entre as peças foram realizadas utilizando o mesmo material, e a montagem e o tempo necessários para o processo também foram considerações afetadas por essas escolhas, conforme demonstrado na Figura 129.

Figura 129 – TDFab+Arch | CN Jato d'água



[CN Jato d'água - acesso](#)



Fonte: Autoria própria

A Figura 130 ilustra critérios aplicados a esse estudo de caso e representados na Taxonomia para Fabricação Digital, como os nome dos autores, origem, escala, instituição, processo construtivo, tipo de maquinário utilizado, predominância do material, topologia das superfícies, material e aspectos relacionados ao projeto.

Figura 130 – Síntese na TDFab+Arch



Fonte: Autoria própria

4.1.3. CN | Impressora 3D

A Casa Nordestinha foi produzida em uma impressora 3D no laboratório de fabricação digital do MIT / EUA. Durante a impressão, o modelo foi reduzido para uma escala de 1/150, o que acarretou um tempo de fabricação de 3h40min. Embora a secagem fosse prevista para levar 8h, foi concluída em apenas 3h10min, resultando em um tempo total de 6h50min (Figura 131). Apesar da técnica de fabricação digital utilizada não ser a mais usual para um processo aditivo, foram feitas adaptações no modelo para evitar alterações expressivas na estrutura. Para tornar a impressão mais fácil, o arquivo foi rotacionado em 90 graus e posto os pórticos na seção horizontal. Essa rotação

permitiu que o eixo da máquina pudesse depositar mais filamentos nas peças que estruturam os pórticos e assim reforçar a estabilidade do objeto (Figura 132).

Figura 131 – Modelo para impressão

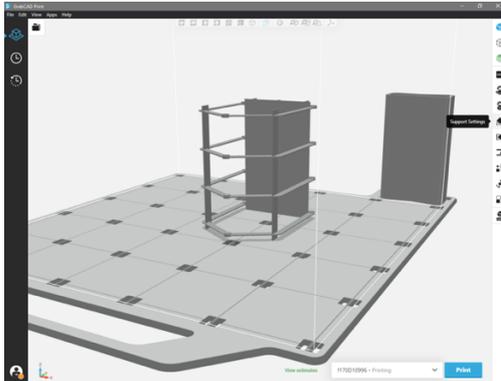
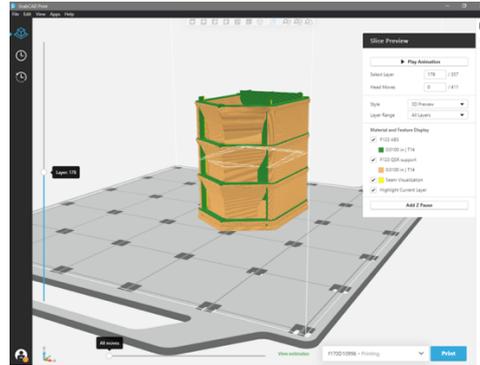


Figura 132 – Apoios produzidos pela máquina



Fonte: Acervo pessoal

Inicialmente, a ideia era produzir os encaixes separadamente e, em seguida, montar todas as peças, seguindo o método utilizado em experimentos anteriores. No entanto, para garantir a rigidez da estrutura no processo aditivo, optou-se por fabricá-la de uma só vez e com peças ligeiramente maiores (Figura 132). Como resultado, os encaixes que seriam peças muito pequenas, foram modificados por nós e esse processo foi simplificado (Figura 134)

Figura 133 – Processo de fabricação

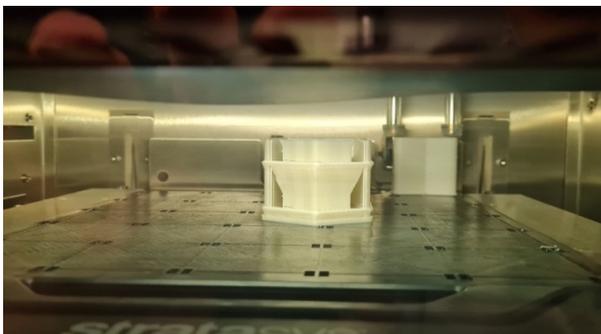


Figura 134 – Finalização do protótipo



Fonte: Acervo pessoal

Ao mudar o processo de fabricação para um método aditivo, certos critérios tornaram-se irrelevantes, como os critérios de "uniões/encaixes" que não são necessários nesse processo e o critério de "transporte" que não se aplica em escalas pequenas. Em relação ao critério de "resíduo", é importante destacar a existência dos suportes utilizados pela máquina para garantir a estabilidade da peça durante a fabricação (Figura 135). No entanto, ao final, esses suportes não são relevantes para o objeto (Figura 136).

Figura 135 – Protótipo com suportes

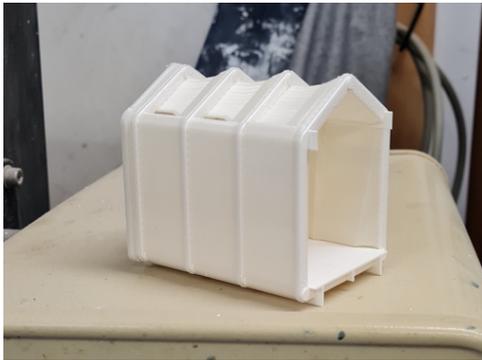


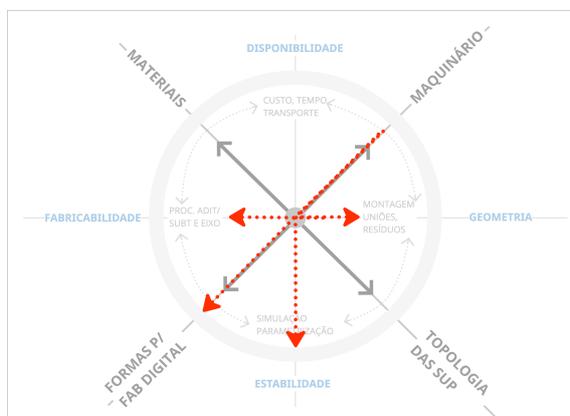
Figura 136 – Secadora para retirar os suportes



Fonte: Acervo pessoal

Desta vez, o processo projetual da Casa Nordestinha o maquinário direcionou as escolhas relacionadas ao material e ao processo aditivo. Um dos desafios foi garantir a estabilidade das peças, especialmente considerando que os planos seriados não são comumente fabricados em impressoras 3D. Além disso, foi necessário levar em conta a montagem do projeto, o que levou à decisão de produzi-lo de forma monolítica, eliminando a necessidade de encaixes entre as peças. Durante o processo de secagem, os suportes do protótipo foram removidos pela impressora 3D, resultando na geração de resíduos provenientes dessa exclusão (Figura 137).

Figura 137 – TDFab+Arch | CN Impressora 3D



[CN Impressora 3D - acesso](#)



Fonte: Autoria própria

Por fim, o processo de fabricação foi necessário para testar a máquina e identificar os critérios relevantes à medida que se modificava o maquinário e os materiais do protótipo (Figura 138). Assim, ficou evidente que os critérios mais impactantes são o custo, o tempo e a estabilidade da peça (Figura 139).

Figura 138 – Protótipo impresso



Figura 139 – Síntese dos critérios



Fonte: Autoria própria

4.2. Catálogo do Homo Faber

O uso da Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch) no catálogo do Homo Faber (HF) compõe a quinta etapa de do processo de validação externa (5.VE), sendo a etapa final. Ela está descrita no item 1.3, na etapa D da abordagem metodológica que responde ao objetivo específico IV.

Nessa etapa, a TDFab+Arch é utilizada como ferramenta para catalogar os projetos materializados por meio da fabricação digital e, posteriormente comparar as soluções encontradas pelos projetistas. É possível acompanhar a análise realizada a partir dos dados preenchidos na Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura. A validação externa concentra-se apenas nos projetos que foram materializados utilizando tecnologias como impressoras 3D, máquinas CNC, cortadoras a laser, entre outras. Diante disso, nesse recorte da pesquisa não foram incluídas as pesquisas do HF que abordam experimentos sociais ou com outros tipos de tecnologia.

O catálogo, até o presente momento, possui duas versões publicadas Homo Faber 1.0 (HF1) e Homo Faber 2.0 (HF2). A primeira edição, HF1, concentrou-se no mapeamento exploratório e pesquisa da fabricação digital na América Latina. Enquanto isso, o HF2 representou uma fase de experimentação prática e aplicação da fabricação digital em projetos, com o objetivo de impulsionar a inovação e o desenvolvimento na região (SCHEEREN; HERRERA; SPERLING, 2018; SPERLING; HERRERA, 2015).

O Homo Faber também tem como objetivo estabelecer uma rede de colaboração e troca de conhecimentos entre profissionais, acadêmicos e instituições da região. Além disso, investiga a fabricação digital e divulga os resultados por meio de exposições e artigos científicos. Dessa maneira, as publicações estão agrupadas em categorias próprias como a origem do projeto, laboratório responsável ou tipo de fabricação do

projeto em questão. O catálogo apresenta um panorama abrangente da produção latino-americana em fabricação digital, especialmente na área de arquitetura, englobando móveis, utensílios domésticos, joias e instrumentos musicais. Cada objeto catalogado contém informações detalhadas sobre sua fabricação, incluindo processos e materiais utilizados (SCHEEREN, 2022; SPERLING; HERRERA; SCHEEREN, 2020).

O Homo Faber desempenha um papel importante no processo de validação que se iniciou nessa tese para a Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch), uma vez que apresenta objetos fabricados por projetistas que utilizam tecnologias digitais em sua produção. Essa característica torna o contexto do Homo Faber altamente propício para a aplicação da TDFab+Arch, uma vez que os projetos catalogados foram fabricados digitalmente na América Latina (ou Sul Global). Isso significa que o Homo Faber oferece um ambiente ideal para testar e validar a eficácia da TDFab+Arch em cenários reais de fabricação, fornecendo exemplos concretos de como a fabricação digital está sendo aplicada com sucesso na região.

Nesta pesquisa, foi realizada a aplicação da Taxonomia para Fabricação Digital nos catálogos do Homo Faber 1.0 e 2.0, contemplando um total de quarenta e dois projetos, dos quais dezoito pertenciam ao HF1 e vinte e quatro exemplares ao HF2. Selecionou-se apenas os projetos que constavam nesses catálogos e tiveram como resultado um objeto materializado. Desse modo, as experiências sociais ou ensaios teóricos sobre assuntos que permeiam a fabricação digital foram descartados desse processo de catalogação. Essa catalogação objetivou avaliar a eficácia dos critérios estabelecidos na aplicação desses projetos selecionados e se a ferramenta elaborada era possível de ser utilizada para comparar os projetos.

Com base na interação dos projetos com a taxonomia, foi desenvolvida uma versão da taxonomia que inclui setas vermelhas indicativas. Essas setas destacam os

critérios que foram aplicados no projeto e que puderam ser identificados por meio do texto, imagens e vídeos fornecidos pelo catálogo do Homo Faber. A presença das setas na taxonomia tem como objetivo demonstrar o processo de desenvolvimento dos projetos e as preocupações dos projetistas na criação dos protótipos.

Então, nesse processo de catalogação, constatou-se que os critérios formulados desempenharam um papel útil ao proporcionar uma compreensão hierárquica e relacional entre eles. Por exemplo, a categoria "escala" contribuiu para a definição do ponto de partida dos projetos e para a classificação dos projetos finalizados, permitindo comparações e a compreensão das relações entre os critérios.

Este tópico compreende três seções que abordam critérios e categorias distintos nos projetos catalogados no Homo Faber apresentam similaridades e diferenças com os critérios elaborados para a Taxonomia para Fabricação Digital (item 3.4). Os projetos descritos possuem fotos, vídeos e *QRCODE* para acesso do projeto aa TDFab+Arch. Essas análises contribuíram para aprimorar e identificar as limitações da ferramenta, além de explorar novas oportunidades de criação e materialização.

4.2.1. HF | Escalas e a geometria

Esta seção tem como objetivo analisar os projetos catalogados nas edições do Homo Faber, considerando a perspectiva da escala, abrangendo desde projetos de pequena escala até projetos de grande e extragrande escala. Será estabelecida uma relação entre os critérios da Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch) e esses projetos, visando avaliar eles se aplicam e influenciam a materialização dos mesmos.

O projeto "Empatia Mapeada", de Guto Requena, e o Bancapar são exemplos no

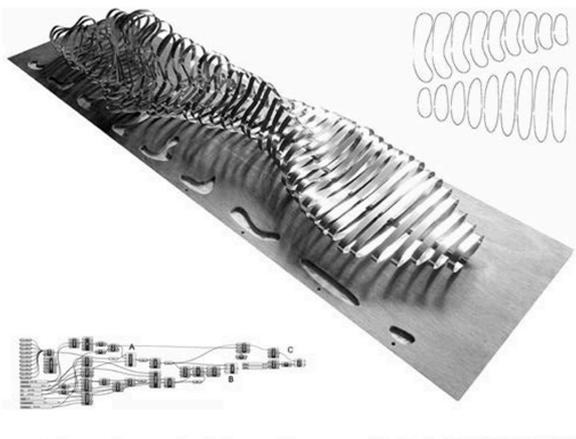
Homo Faber que apresentam uma relação abrangente com os critérios da Taxonomia para Fabricação Digital aplicada à arquitetura. Ambos os projetos utilizam um único material em sua fabricação, sendo metal para o “Bancapar” e compensado para o “Empatia Mapeada”. Ambos foram realizados por meio de processos subtrativos com uma fresadora CNC. Esses projetos empregam a técnica de planos seriados para desenvolver e construir suas formas livres. No Bancapar, a forma é alcançada por meio de cortes em uma placa, enquanto no Empatia Mapeada a maleabilidade dos materiais é explorada (Figura 140 e Figura 141).

Figura 140 – HF2 | Empatia mapeada



Fonte: Scheeren *et al.* (2018)

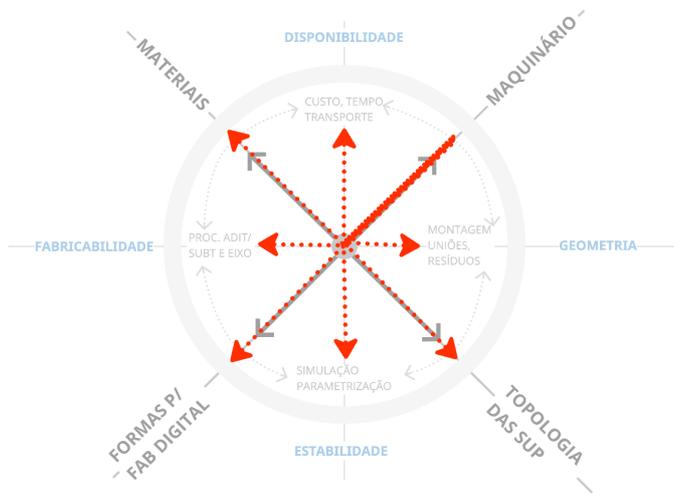
Figura 141 – HF1 | BANCAPAR



Fonte: Sperling *et al.* (2015)

Os projetos descritos se enquadram na escala grande e partem da disponibilidade do maquinário, que influencia na escolha dos materiais disponíveis, o custo, tempo e transporte. Como se trata de um projeto de escala grande, a estabilidade é algo importante e garantida pelas uniões. Além disso, a parametrização foi adotada como uma estratégia para definir as curvas, utilizando simulações como base para essas definições. Esses critérios demonstram uma preocupação abrangente com diversos aspectos da fabricação digital (Figura 142).

Figura 142 – TDFab+Arch | Escala grande



Fonte: Autoria própria

[Empatia mapeada - acesso](#)



[Bancapar - acesso](#)



Por outro lado, a utilização de objetos em escala pequena é amplamente difundida devido à sua redução de custos e facilidade na representação de protótipos em diversos contextos, incluindo projetos relacionados ao patrimônio arquitetônico, projetos sociais, comunitários e destinados a pessoas com mobilidade reduzida. Exemplos dessas aplicações são os projetos intitulados "Patrimônio arquitetônico na palma da mão" (*"Architectural Heritage In The Palm Of Hand"*) e "uma base conceitual comum" (*"A common conceptual ground"*).

Nesses modelos, a preocupação com o formato do encaixe é minimizada, pois devido à escala reduzida, eles tendem a ser monolíticos. Além disso, questões como estabilidade do elemento, transporte e tempo de construção perdem suas relevâncias nesse contexto. Ainda nesse contexto, a geração de resíduos é reduzida e a utilização de simulação e parametrização se torna necessária, caso o protótipo seja parte de um projeto maior. A topologia da superfície, geometria e o maquinário utilizado também são mais acessíveis nessas situações de escala reduzida, conforme as Figura 143 e Figura 144.

Figura 143 – HF1 | Patrimônio arquitetônico na palma da mão



Figura 144 – HF2 | Uma base conceitual comum

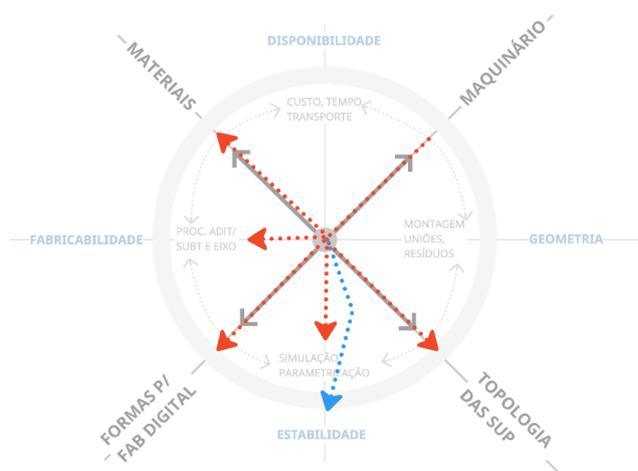


Fonte: Sperling *et al.* (2015)

As relações analisadas consideram o maquinário como ponto de partida para a criação de protótipos e modelos em escala reduzida. Nesse contexto, as formas para fabricação digital se conectam diretamente com as topologias das superfícies, o que influencia a definição das curvas do modelo. Além disso, os materiais utilizados são escolhidos levando em consideração o tipo de processo de fabricação empregado, seja ele aditivo ou subtrativo. Assim, nos projetos são feitos protótipos utilizando materiais diferentes em sua totalidade.

No projeto "Patrimônio arquitetônico na palma da mão", é dada uma atenção especial às simulações para garantir o desempenho das formas desenvolvidas. Já no projeto "uma base conceitual comum", há uma maior preocupação com as questões de estabilidade, representada pela seta na cor azul. Dessa forma, o uso da TDFab+Arch permite considerar as interconexões entre o maquinário, as formas de fabricação, as topologias das superfícies e os materiais utilizados, oferecendo uma visão gráfica do que foi desenvolvido nos projetos, como ilustrado na Figura 145.

Figura 145 – TDFab+Arch | Escala pequena



Fonte: Autoria própria

[uma base conceitual comum - acesso](#)



[Patrimônio arquitetônico na palma da mão - acesso](#)



4.2.2. HF | Processos de fabricação, superfícies e materiais

Ao focar nos processos de fabricação aditivos e subtrativos, é possível aplicá-los de forma complementar em um mesmo projeto. Por exemplo, no projeto "Fabricação artesanal de ladrilhos digitais" (*"Artisanal digital tile fabrication"*) do Homo Faber, o processo subtrativo é utilizado como base para o processo aditivo. Nos processos aditivos, como a moldagem, é possível criar uma forma a partir de peças cortadas para a geometria final.

Dessa forma, ocorre uma interdependência entre o processo subtrativo de corte das peças e o processo aditivo subsequente de moldagem. Essa integração entre os dois processos demonstra como a fabricação digital permite explorar diferentes abordagens e tirar proveito das características únicas de cada método, resultando em soluções criativas e eficazes na materialização de projetos, conforme a Figura 146.

Figura 146 – HF2 | Fabricação artesanal de ladrilhos digitais



Fonte: Scheeren *et al.* (2018)

Este processo que inclui as suas formas de fabricação pode utilizar materiais como concreto, argila e filamentos para impressoras 3D, resultando em peças com curvaturas simples, duplas ou formas livres. Se a intenção desse objeto for uma escala grande, necessita-se ou de grandes formas ou de encaixes entre as peças menores.

Ao vincular as técnicas de fabricação digital com as uniões, entende-se a afinidade dos planos seriados, conformação, tesselação e dobra com o uso de encaixes. Ressalta-se que há elementos que podem ser fabricados com um material sem necessitar de encaixes, apenas a partir de fôrmas e o empilhamento das peças, como na “Escultura Helix” do *Onion Lab* na Figura 147.

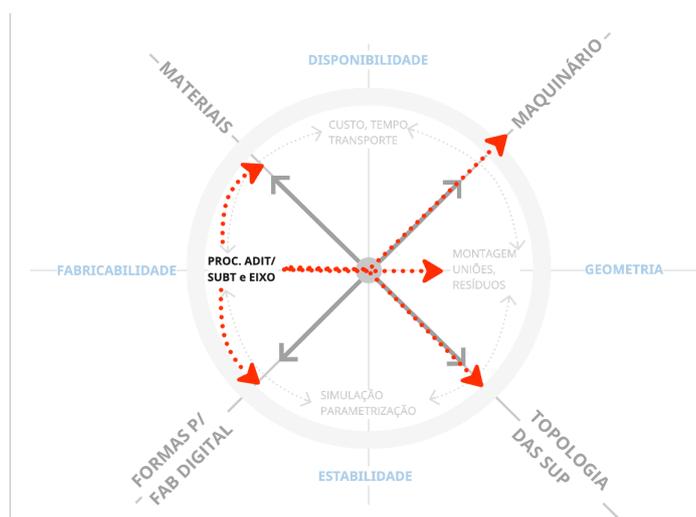
Figura 147 – HF2 | Escultura Helix



Fonte: Scheeren *et al.* (2018)

As relações descritas acima nos projetos podem ser vistas na TDFab+Arch, no qual a partir dos processos de fabricação há uma influência em outros eixos e critérios da tabela, como materiais, maquinário, montagem e uniões, topologia das superfícies e formas para fabricação digital. Desse modo, há uma conexão entre a ferramenta e os projetos descritos no Homo Faber, conforme a Figura 148.

Figura 148 – TDFab+Arch | Processo de fabricação



Fonte: Autoria própria

[Escultura Helix - acesso](#)



[Ladrilhos artesanais - acesso](#)



Destaca-se também que a escala e a complexidade da forma podem ser afetadas quando se combinam duas ou mais técnicas em um mesmo objeto, exigindo a avaliação de custo e o benefício da produção e a necessidade de conectores para estabilização. Além disso, as técnicas de contorno podem ser utilizadas para fabricação a partir do processo subtrativo, como em uma escultura.

Esse exemplo é visto como mostrado no projeto “Lounge do Venture” (“*Lounge for Brazilian venture*”) que foram projetadas utilizando topologias a partir de um processo de escultura digital para articular as superfícies dos assentos de sofás, topos de bar e nichos. Foi desenvolvido um algoritmo específico em software paramétrico para

automatizar a preparação dos arquivos de fabricação.

O modelo 3D foi seccionado de acordo com a profundidade máxima da fresadora CNC. As peças foram cortadas, numeradas e agrupadas nas dimensões possíveis de serem transportadas. As peças cortadas serviram como base para a aplicação de resina e fibra de vidro, sendo essa peça também fruto de um processo subtrativo com aditivo (Figura 149). No outro projeto, Estruturas funiculares ou “*Funicular Shells*” utilizou-se experiências de modelagem, fabricação CNC e montagem de dois pavilhões com forma funicular. O pavilhão consistia em elementos ligados por discos, formando um sistema de placas, enquanto o segundo pavilhão era composto por caixas quadrangulares com aletas, resultando em uma concha fina com nervuras. A geração digital das formas, subdivisão em peças e simulações estruturais foram realizadas para analisar o comportamento e as tensões desenvolvidas nas estruturas. Necessita-se nessa análise a escala do objeto e sua estabilidade, bem como a necessidade de conectores, transporte e custo. A topologia da superfície é afetada pelo modo como as peças são encaixadas e qual técnica de fabricação digital é utilizada (Figura 150).

Figura 149 – HF2 | Lounge do Venture



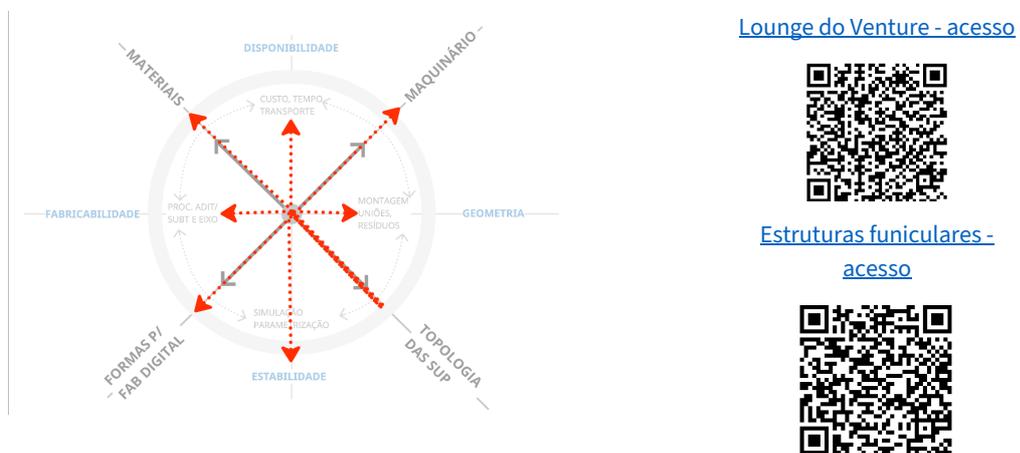
Figura 150 – HF2 | Estruturas funiculares



Fonte: Scheeren *et al.* (2018)

Os projetos mencionados demonstram uma conexão entre os diferentes critérios abordados na Taxonomia para Fabricação Digital. Essa conexão se inicia na categoria de topologia das superfícies e percorre os critérios relacionados a materiais, maquinário, formas para fabricação digital, estabilidade e processos aditivos e subtrativos. Essa interação entre os critérios tem impacto nos aspectos de custo, tempo e transporte, assim como na montagem, uniões e na geração de resíduos (Figura 151).

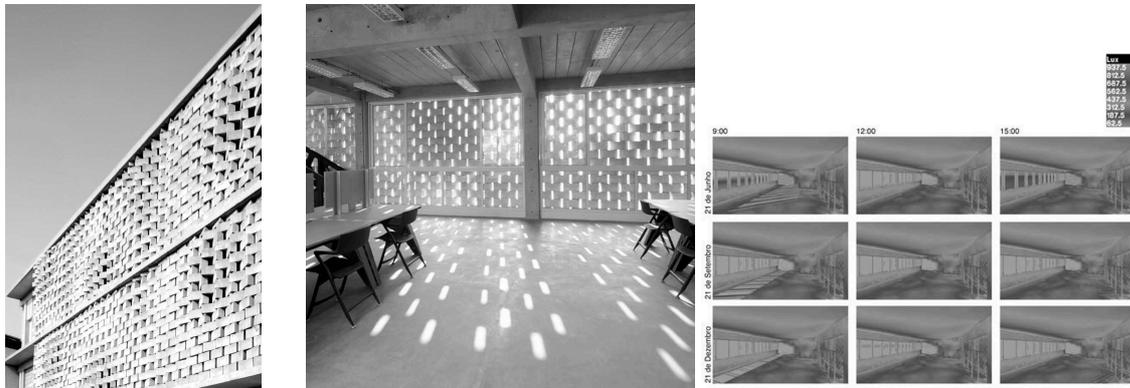
Figura 151 – TDFab+Arch | Topologia das superfícies



Fonte: Autoria própria

A fim de criar formas complexas de dupla curvatura com forma livre, é comum utilizar processos subtrativos com encaixes. É possível utilizar maquinário como robôs ou deposição de material para construção de curvas, mas deve-se considerar a estabilidade e conexão entre peças, por exemplo. Além disso, adiciona-se outra camada de complexidade com uso de simulação e desempenho – tanto ambiental como estrutural – com o processo de montagem do projeto. Esse exemplo pode ser visto no projeto do “CoBLOGó” no qual há o desenvolvimento de uma peça monolítica em concreto que compõe uma fachada com forma livre. As disposições das peças foram ditadas a partir de simulações computacionais de desempenho ambiental, conforme a Figura 152.

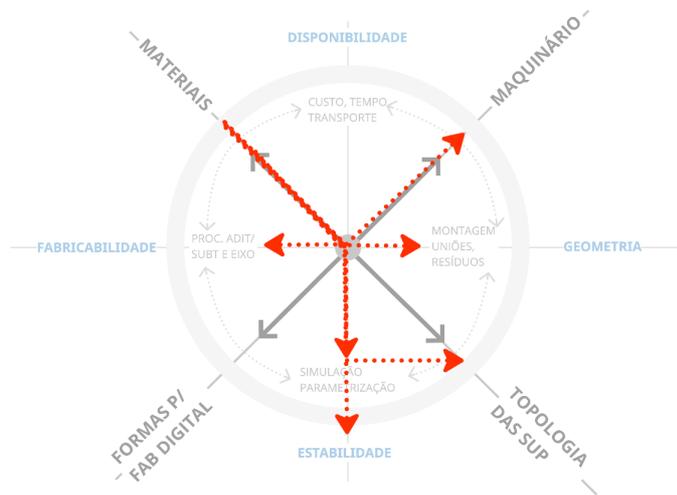
Figura 152 – HF1 | CoBLOGó



Fonte: Sperling *et al.* (2015)

Nesse exemplo, a Taxonomia para Fabricação Digital é iniciado com a seleção do concreto como material, o modo de fabricá-lo - que influencia as simulações computacionais as quais auxiliam na definição da topologia das superfícies. Além disso, a disponibilidade do maquinário é considerada para a realização da montagem e das uniões entre as peças. Esse processo demonstra a interação entre os diferentes critérios da Taxonomia para Fabricação Digital, em que a escolha do material, a definição da geometria e a utilização adequada do maquinário são elementos-chave para a realização do projeto (Figura 153).

Figura 153 – TDFab+Arch | Materiais



[Coblogó - acesso](#)

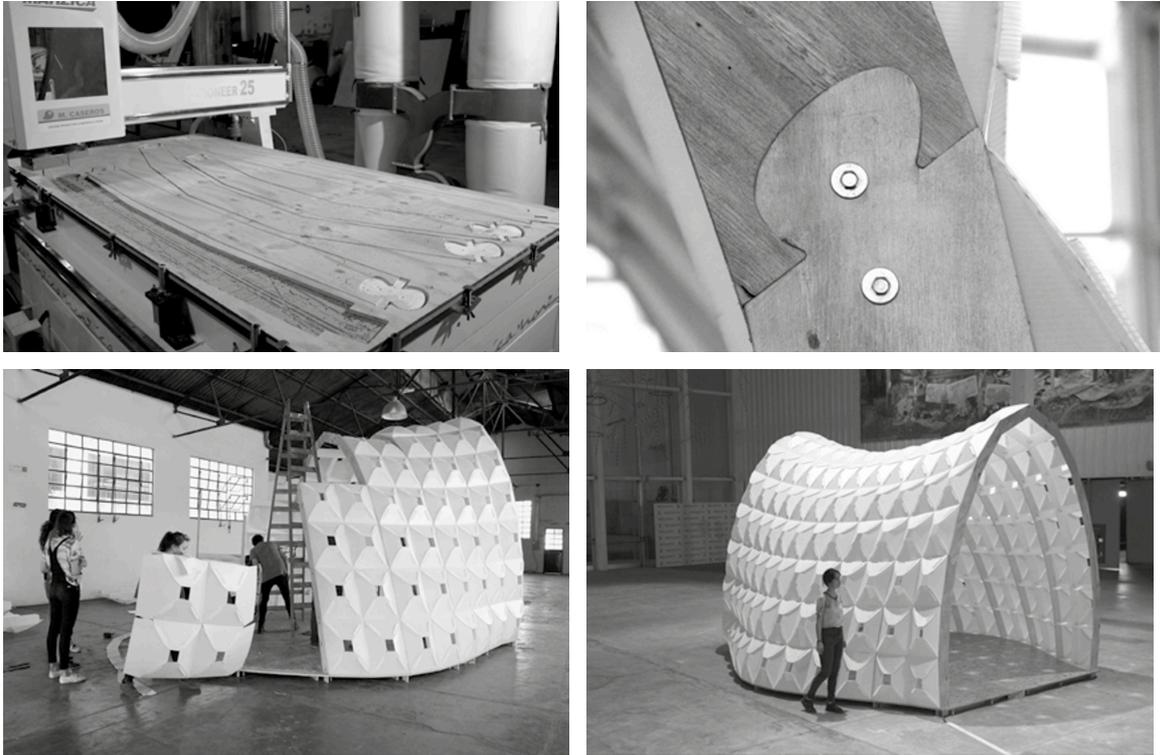


Fonte: Autoria própria

4.2.3. HF | Uniões e materiais

Um exemplo de projeto que explora as uniões e materiais é a "Furetsu", que utiliza um material leve para criar peças com topologias de superfície altamente curvadas ou formas livres. O projeto faz uso de materiais como placas de compensado, acrílico e metal, e emprega ferramentas de CNC ou cortadoras a laser para realizar dobras e tesselações nesses materiais. Além disso, essa técnica pode ser utilizada como um método de encaixe que facilita a dobra da forma, ou ainda por meio da geometria das peças em si. Essas estratégias são ilustradas na Figura 154.

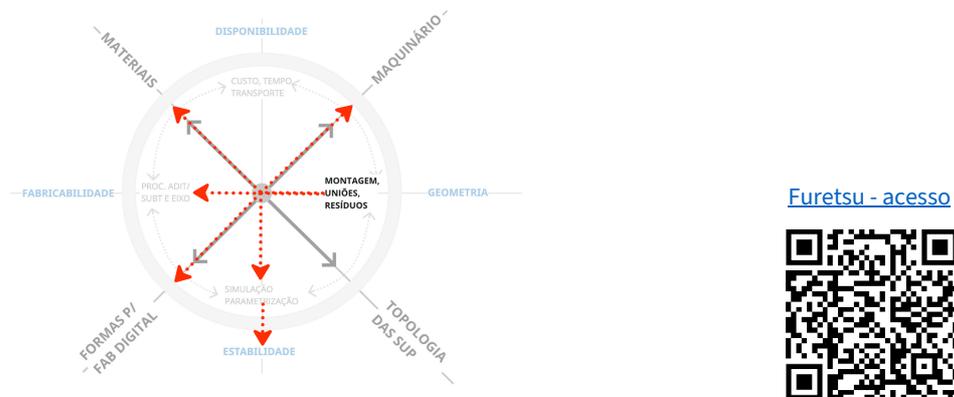
Figura 154 – HF2 | Furetsu



Fonte: Scheeren *et al.* (2018)

Nesse projeto, foi utilizado um material leve para fabricar peças independentes que foram cortadas separadamente. Essas peças foram sobrepostas em uma estrutura piramidal e conectadas por uma estrutura rígida, que foi cortada utilizando a tecnologia CNC. No contexto da fabricação digital, as uniões desempenham um papel crucial ao unir o material, a forma e fornecer estabilidade às peças. A forma final do pavilhão é alcançada por meio de duas técnicas de fabricação digital simultâneas: dobra e tesselação, a partir de peças planas que resultam em uma forma de dupla curvatura. Essa geometria complexa foi gerada por simulações computacionais e permite uma montagem e desmontagem fácil do pavilhão, possibilitando sua mobilidade e reutilização (Figura 155).

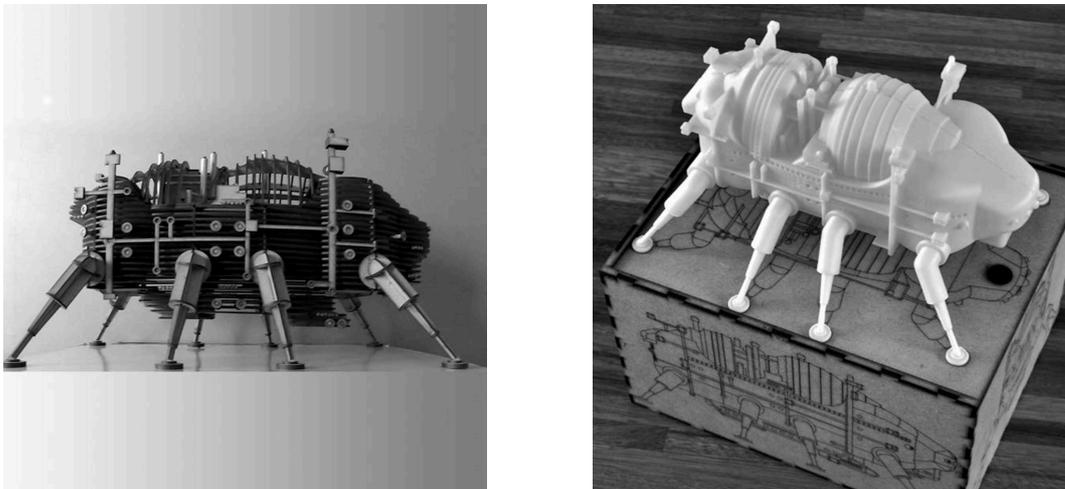
Figura 155 – TDFab+Arch | Uniões e materiais



Fonte: Autoria própria

À medida que avançamos na discussão sobre escala e uniões, observamos que em peças de pequeno porte os encaixes não se fazem tão necessários, pois os objetos tendem a ser autoportantes ou maciços. O projeto “Uma cidade ambulante; único vs Reprodutível” (“*A Walking city; Archigram Unique vs Reproducible*”) foi fabricado utilizando dois tipos de materiais, classificado como multimateriais no contexto da TDFab+Arch. No primeiro protótipo, a forma foi alcançada por meio de encaixes entre as peças de compensado. Já no segundo experimento, o modelo foi fabricado de forma monolítica, dispensando a necessidade de encaixes (Figura 156).

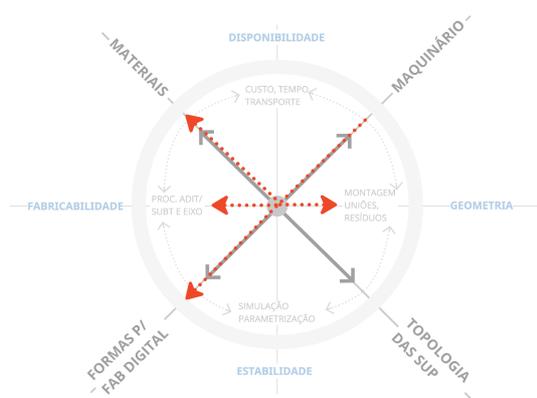
Figura 156 – HF1 | Uma cidade ambulante; único vs reprodutível



Fonte: Sperling *et al.* (2015)

Nesse contexto, o projeto foi concebido levando em consideração o maquinário disponível e estabelecendo uma relação com os materiais apropriados para Fabricação Digital, seja por meio de processos aditivos ou subtrativos. Paralelamente, há uma atenção na montagem das peças e à garantia de sua estabilidade estrutural. Essas considerações estão documentadas na TDFab+Arch e podem ser vistas na Figura 157.

Figura 157 – TDFab+Arch | Escala e Uniões



[Uma cidade ambulante - acesso](#)

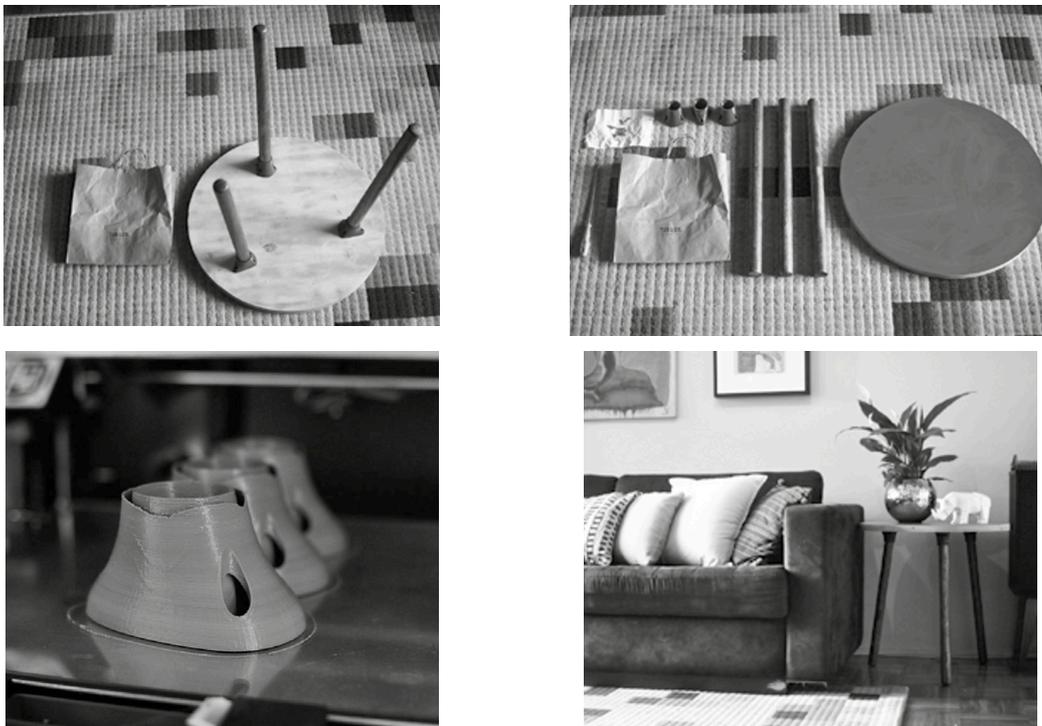


Fonte: Autoria própria

Quanto às uniões das peças de um mesmo objeto, observou-se dois tipos que se relacionam com os critérios formulados: quando os encaixes são realizados com o mesmo material do objeto construído, como em objetos de madeira/compensado com encaixes em sambladuras para plano seriados, por exemplo. Ou ainda, quando as peças são unidas utilizando materiais diferentes, como no caso de objetos de compensado e encaixes de parafusos e pregos ou ainda fabricados em impressoras 3D.

Esse é o caso do projeto 360 Móveis (“360° FURNITURE”), uma linha de móveis que integra objetos comuns, como vassouras e enxadas, com a tecnologia de impressão 3D. Essa abordagem permite a produção customizada dos itens, adaptando-se às preferências de cada usuário, conforme a Figura 158.

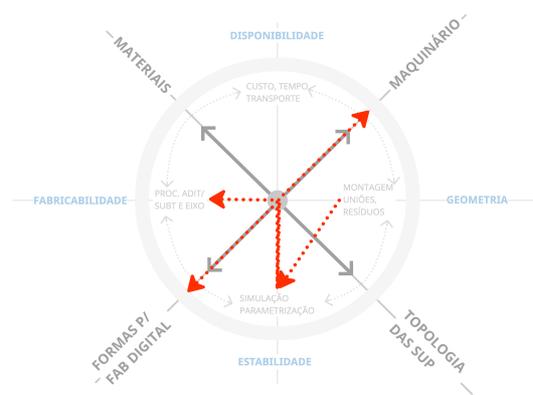
Figura 158 – HF2 | 360 Móveis



Fonte: Scheeren *et al.* (2018)

Este projeto é caracterizado pelo papel desempenhado pelas uniões na montagem de móveis. Através do uso da parametrização, essas uniões podem ser otimizadas e adaptadas de acordo com as necessidades específicas. O processo de montagem é realizado por meio de uma impressora 3D, que é capaz de unir peças cortadas em compensado por meio de um processo subtrativo

Figura 159 – TDFab+Arch | Uniões e maquinário



Fonte: Autoria própria

[360 Móveis - acesso](#)



5. DISCUSSÕES

As discussões deste capítulo permeiam pelos resultados decorrentes do embasamento teórico e da diretriz metodológica adotada para o desenvolvimento da ferramenta em questão. Isto incluiu a revisão sistemática da literatura, a análise de conteúdo e a estruturação das taxonomias; além das aplicações práticas da Taxonomia para Fabricação Digital (TDFab+Arch) por meio de experimentos realizados na Casa Nordestinha e no catálogo do Homo Faber, destacando também a transformação da TDFab+Arch em uma ferramenta *online*.

A metodologia adotada neste estudo revelou-se eficaz para o desenvolvimento de uma taxonomia aplicável na classificação de projetos materializados e como um recurso para o processo projetual de arquitetura voltado para Fabricação Digital.

As revisões realizadas desempenharam um papel fundamental na identificação de lacunas no conhecimento e na definição das diretrizes para a construção da Taxonomia para Fabricação Digital. Para uma análise mais aprofundada dos artigos selecionados durante a revisão sistemática, conduziu-se uma análise qualitativa de conteúdo, empregando técnicas de codificação específicas da TDFab+Arch.

As revisões sistemáticas da literatura (RSLs) identificaram a lacuna existente e a partir desse processo foi possível atribuir três funções. Primeiramente, foi confirmada a falta de estruturas taxonômicas que orientassem devidamente o processo de fabricação digital. Em seguida, foi estabelecido o universo de estudo ao selecionar as estruturas taxonômicas relevantes para a análise qualitativa de conteúdo, validando assim a taxonomia utilizada. Por fim, os resultados embasaram o desenvolvimento da taxonomia ao identificar critérios frequentemente nos processos projeto de arquitetura.

A análise qualitativa de conteúdo foi embasada no universo de estudo da RSLs que permitiram esclarecer as relações entre as categorias e critérios, identificando quais poderiam ser agrupados e quais eram mais frequentes. Como resultado, obteve-se uma compreensão abrangente dos conceitos relacionados à fabricação digital, bem como das necessidades e desafios enfrentados pelos projetistas ao longo do processo projetual.

O processo de estruturação da taxonomia revelou-se esclarecedor ao identificar a lacuna existente na literatura científica em relação à sistematização de pensamentos no contexto da fabricação digital, um tema relativamente novo. Assim, reforçam a importância da taxonomia como uma ferramenta essencial para orientar e estruturar os projetos relacionados à fabricação digital na área da arquitetura. Essa estruturação

desempenhou um papel fundamental ao promover uma compreensão mais clara e sistemática, facilitando a aplicação da Taxonomia para Fabricação Digital tanto no desenvolvimento de projetos nessa área, como elemento de classificação de projetos concluídos. Por meio da análise de diferentes taxonomias provenientes de diversas áreas do conhecimento, relacionadas à arquitetura e ao processo de fabricação, foi possível investigar e sistematizar as diferentes técnicas, materiais, equipamentos e aspectos de projeto envolvidos nesse processo.

O processo foi abrangente, e ao mesmo tempo enriquecedor, uma vez que revelou os critérios mais discutidos na literatura científica e demonstrou como esses critérios podem ser aplicados no contexto da fabricação digital. Portanto, evidenciou-se a relevância da Taxonomia para Fabricação Digital como uma ferramenta colaborativa e multidisciplinar.

A aplicação da taxonomia nos experimentos realizados na Casa Nordestinha e no catálogo do *Homo Faber* confirmou a validade da TDFab+Arch em diferentes contextos. O primeiro experimento envolveu a aplicação da taxonomia no processo projetual, enquanto o segundo explorou sua utilização como ferramenta de classificação. Essas etapas possibilitaram a identificação de potenciais desafios e obstáculos na aplicação da TDFab+Arch em projetos reais de arquitetura e construção.

No contexto do projeto da Casa Nordestinha, o processo projetual foi orientado pelas capacidades do maquinário disponível, o que possibilitou a realização de três experimentos: a partir de uma fresadora CNC, uma cortadora a jato de água e uma impressora 3D. Os protótipos obtidos a partir desses experimentos foram submetidos à análise na TDFab+Arch, desempenhando um papel crucial como guia no processo projetual, fornecendo diretrizes para a fabricação em diversos cenários.

Na fabricação da Casa Nordestinha (CN) utilizando a TDFab+Arch, foram

realizadas avaliações do desempenho da metodologia em relação à sua coerência e viabilidade. Essa análise permitiu verificar se as decisões tomadas estavam alinhadas com os demais critérios da categoria e como isso poderia ser aplicado na prática. As experiências adquiridas por meio desse processo proporcionaram diversas perspectivas que contribuíram para o constante desenvolvimento e aprimoramento da TDFab+Arch como uma ferramenta eficaz e confiável na fabricação digital.

No primeiro experimento realizado com a fresadora CNC, as restrições de transporte foram consideradas durante o processo projetual da Casa Nordestinha. A seleção do material e as simulações computacionais empregadas auxiliaram na avaliação do desempenho estrutural e ambiental do projeto, permitindo a otimização da forma e dos encaixes das peças.

No segundo experimento, utilizando a impressora 3D, foram enfrentados desafios em relação à estabilidade das peças, devido à natureza incomum da fabricação de planos seriados nesse tipo de tecnologia. Para facilitar a montagem, optou-se por desenvolver o projeto de forma monolítica, eliminando a necessidade de encaixes entre as peças. Durante o processo de secagem, os suportes utilizados no protótipo foram removidos, resultando na geração de resíduos provenientes dessa exclusão. Por fim, com a cortadora de jato d'água, foi essencial compreender como o projeto poderia ser adaptado às dimensões das placas de metal disponíveis, o que teve influência direta na determinação da espessura das peças e na sua estabilidade. As uniões foram realizadas utilizando o mesmo material. A montagem e o tempo do processo foram considerações afetadas por essas escolhas, buscando otimizar a eficácia e a praticidade do projeto.

Os protótipos desenvolvidos desempenharam um papel fundamental no aprimoramento contínuo do processo projetual baseado na Taxonomia para Fabricação Digital. Esses modelos permitiram testar e verificar a eficácia dos critérios estabelecidos,

agrupados em categorias, que orientaram o processo projetual. Além disso, contribuíram para a validação dos critérios e evidenciaram sua influência na seleção de maquinário, definição da escala, considerações de custo e estratégias de fabricação. O uso de tecnologias como impressão 3D, corte com fresadora em CNC e modelagem paramétrica possibilitou explorar a Taxonomia de forma prática. A integração de simulações computacionais permitiu avaliar o desempenho estrutural e ambiental do projeto, otimizando a forma e os encaixes das peças.

Essas abordagens contribuíram para aprimorar a eficácia e a qualidade do processo de fabricação digital empregado e mostra-se uma ferramenta com potencial para ser aplicada em atividades da docência, tanto na graduação como na pós-graduação. Bem como em experimentos controlados: workshops, oficinas ou entrevistas. A utilização da TDFab+Arch no projeto também demonstrou a capacidade da metodologia em lidar com diferentes máquinas e materiais, adaptando-se às necessidades específicas de cada contexto de fabricação. Através dessa etapa de experimentação e validação, foi possível aprimorar a compreensão das melhores práticas no uso da taxonomia para estabelecer diretrizes, garantir resultados consistentes e de qualidade na fabricação digital. Isso auxilia no processo de confiabilidade da adoção da taxonomia como uma ferramenta eficaz no processo de projeto e fabricação digital.

No contexto do Homo Faber, o catálogo se estabeleceu como uma referência significativa no campo da fabricação digital, evidenciando o potencial e as oportunidades oferecidas por essa tecnologia na área. O uso da TDFab+Arch no catálogo revelou a relação entre as categorias presentes na taxonomia, ou seja, entre o maquinário, os processos, as técnicas de fabricação digital, a escala e os materiais na criação de projetos inovadores.

A aplicação da TDFab+Arch auxiliou na catalogação dos projetos concluídos e fornecendo perspectivas sobre o início do processo projetual. Foi observado que os projetos analisados abrangem diversas escalas, sendo influenciados pelas escolhas de materiais, custos, tempo e transporte. A estabilidade é um critério crucial nessas escalas, sendo assegurada por meio das uniões entre as peças. A parametrização é adotada como estratégia para definir as curvas e superfícies dos modelos, utilizando simulações como base para essas definições. A partir dos critérios é possível ter mais controle e refinamento do processo projetual, contribuindo para a qualidade e desempenho dos projetos desenvolvidos dentro do contexto da taxonomia.

Por exemplo a discussão de escala no contexto da fabricação digital é ampla e tem um impacto significativo na comparabilidade dos projetos, caso não seja devidamente considerada. É preciso compreender as diferenças entre as escalas e suas implicações para selecionar a abordagem adequada e aproveitar ao máximo as capacidades oferecidas por essa tecnologia.

Na escala grande, os projetos têm a oportunidade de explorar formas complexas, enfatizar a estabilidade estrutural e considerar aspectos como custo, transporte e tempo de construção. O uso do maquinário como a fresadora CNC e a técnica de fabricação digital de planos seriados permitem que a materialização seja eficaz para geometrias com formas livres. A conexão entre as peças é realizada por objetos metálicos ou conectores fabricados por processos aditivos, contribuindo para a estabilização das peças. A possibilidade de criar peças grandes permite uma variedade de topologias nas superfícies, incluindo curvas simples, dupla curvatura e formas livres. No entanto, à medida que a escala do objeto aumenta, surgem desafios adicionais na materialização, exigindo a consideração de critérios como custo, tempo, montagem, transporte e união entre as peças. Nesse contexto, é comum utilizar a parametrização e simulações

computacionais para reduzir erros na construção das peças e avaliar o desempenho ambiental e estrutural.

Na escala pequena, a fabricação digital é amplamente empregada devido ao menor custo, facilidade na representação de protótipos e modelos, e menor preocupação com a estabilidade estrutural, transporte e tempo de construção. Os objetos nessa escala tendem a ser monolíticos, reduzindo a necessidade de se preocupar com o formato do encaixe. A simulação e a parametrização desempenham um papel importante nessa escala, especialmente quando os protótipos fazem parte de projetos maiores. A topologia da superfície, geometria e o maquinário utilizado são mais acessíveis, permitindo a criação de detalhes precisos.

As experiências realizadas com a Casa Nordestinha e a aplicação da TDFab+Arch no catálogo do Homo Faber revelaram que os critérios elencados são suficientes para a classificação e auxílio no processo projetual. A importância da relação entre as categorias de maquinário, formas para fabricação digital, a escala e os materiais na criação de projetos inovadores. Embasa o entendimento sobre a integração entre teoria e prática possibilita o aperfeiçoamento do processo projetual para Fabricação Digital, permitindo compreender quais decisões nos projetos têm maior impacto nesse contexto. Além disso, por meio dos exemplos concretos apresentados pelo Homo Faber, foi demonstrado o potencial e as possibilidades da fabricação digital, consolidando-o como uma referência relevante nesse campo e abrindo caminho para avanços na área.

Em conclusão, os resultados apresentados confirmam a importância da Taxonomia para Fabricação Digital na compreensão e representação de objetos fabricados digitalmente. A integração entre teoria e prática, juntamente com o uso adequado das técnicas e equipamentos digitais, possibilita melhorar a eficácia, a qualidade e a criatividade nos projetos de fabricação digital. A aplicação da TDFab+Arch

em contextos específicos, como a Casa Nordestinha e o Homo Faber, permitiu uma melhor compreensão das características e peculiaridades desses projetos. Essas conclusões reforçam a relevância da TDFab+Arch como uma ferramenta orientadora e validadora no processo de projeto. Com base nesses resultados, é possível continuar desenvolvendo e aplicando a TDFab+Arch em diferentes áreas e explorar ainda mais o potencial dessa abordagem na fabricação digital.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este último capítulo apresenta as considerações abordadas ao longo da pesquisa, que estão organizadas em três tópicos principais: as limitações da pesquisa, sugestões para trabalhos futuros e as conclusões. O objetivo foi fornecer dados e informações que contribuíssem para aprimorar e retroalimentar a Taxonomia para Fabricação Digital. Cada etapa foi realizada de forma específica e contextualizada, visando identificar os critérios relacionados à fabricação digital.

Ao longo da pesquisa, conduziu-se duas revisões sistemáticas de literatura, uma análise qualitativa de conteúdo, um levantamento das taxonomias existentes no campo da fabricação digital. Além de uma série de experimentos realizados nos laboratórios da UFPB / BR e do MIT / EUA e a tradução da TDFab+Arch em uma ferramenta online que objetiva orientar os projetistas no processo de projeto e classificar os projetos existentes e futuros. Esse desenvolvimento destaca a importância da TDFab+Arch como uma ferramenta abrangente e eficaz para orientar e organizar o processo de projeto na área da fabricação digital. Através disso foi possível identificar critérios relevantes, facilitar a compreensão e classificação dos projetos.

Nesse capítulo, também se abordam as limitações que incluem a seleção de uma amostra específica de projetos para análise, o contexto dos experimentos realizados e a possibilidade de existirem outros critérios relevantes que não foram abordados. Assim, diante disso, surgem diversas sugestões para trabalhos futuros. Essas sugestões incluem a amostra de projetos analisados, a realização de estudos comparativos, a investigação de critérios específicos para diferentes contextos e a aplicação da ferramenta em outros campos além da arquitetura. Além disso, sugere-se o aprofundamento da análise dos resultados obtidos e o aprimoramento da ferramenta online, buscando uma maior interatividade e usabilidade.

As conclusões, limitações e sugestões apresentadas fornecem um panorama das principais descobertas e oportunidades de pesquisa futura, impulsionando assim o avanço e a aplicação dessa abordagem na prática profissional e acadêmica.

Limitações da pesquisa

As limitações das aplicações da Taxonomia para Fabricação Digital estão relacionadas a objetos fabricados digitalmente. Essa restrição surge do embasamento dos artigos da revisão sistemática de literatura que identificou a lacuna da pesquisa se concentra nesse tipo específico de objeto.

Dessa forma, ao tentar aplicar a taxonomia da TDFab+Arch em outros contextos, como a visualização e representação 3D, realidade aumentada ou inteligência artificial, é possível que sua eficácia seja comprometida. Essa ferramenta demonstra sua eficácia principalmente no contexto de objetos em diferentes escalas que possuem potencial para serem materializados no âmbito da arquitetura. Essa é uma das razões que a

ferramenta possui o nome com o símbolo de adição e “arch” remetendo a arquitetura. Porém, isso não impede que a TDFAB+ seja aplicada em outros contextos e possua novas flexões de aplicações.

Sob o foco das revisões sistemáticas de literatura, as limitações que podem surgir nesse processo, estão relacionadas à disponibilidade de artigos em bases de dados específicas. As buscas se restringiram ao espaço de tempo entre os anos de 2009 e 2021, as possibilidades de acesso a determinadas fontes de informação e o viés de publicação, que tende a favorecer a divulgação de resultados positivos. Além disso, a seleção dos artigos a serem incluídos na revisão pode ser influenciada pelo critério de inclusão e exclusão estabelecido, o que pode levar à exclusão de estudos relevantes ou à inclusão de estudos menos representativos.

A análise qualitativa de conteúdo apresenta limitações devido à subjetividade do pesquisador na interpretação e categorização dos dados, o que pode resultar em diferentes interpretações dos mesmos dados por outros pesquisadores. Além disso, a qualidade e consistência dos dados disponíveis nos textos analisados também influenciam os resultados obtidos. Por isso, é importante considerar essas limitações ao realizar uma análise qualitativa de conteúdo e buscar métodos adicionais de validação e triangulação para aumentar a confiabilidade e robustez dos resultados.

A estruturação da taxonomia está limitada aos critérios aplicados, ao consenso estabelecido e a necessidade de atualização contínua para acompanhar as mudanças e avanços na área de estudo. Espera-se que o pesquisador assegure uma descrição clara e abrangente que aborde as nuances do processo de estruturação. Ressalta-se que é importante estar disponível para revisões e ajustes à medida que novas informações e perspectivas surgem.

Os experimentos que compõem essa pesquisa também possuem limitações.

Tanto a Casa Nordestinha quanto o Homo Faber representam projetos específicos e podem não abranger todas as possibilidades e desafios encontrados em outros contextos de fabricação digital. As conclusões desses estudos são baseadas em experiências específicas e podem não ser generalizáveis para todas as aplicações possíveis.

Além disso, há as limitações técnicas e de recursos disponíveis durante os estudos. Tais obstáculos podem ter influenciado as decisões de projeto e as abordagens adotadas, como as restrições de maquinário, disponibilidade de materiais e conhecimentos técnicos podem ter limitado as opções exploradas e as soluções alcançadas. Outra limitação é a temporal, uma vez que os estudos foram realizados em um determinado período, que também pode ter limitado a incorporação de avanços ou inovações mais recentes na área da fabricação digital. Assim, novos maquinários, tecnologias e materiais podem ter surgido e podem impactar na análise dos experimentos.

Sugestões para trabalhos futuros

No âmbito acadêmico, a Taxonomia para Fabricação Digital (TDFab+Arch) pode ser utilizada para o processo projetual e para a classificação de objetos, sendo essencial para os componentes curriculares que tratem sobre o tema.

Os critérios que compõem a TDFab+Arch podem ser aplicados como protocolo da base de revisões sistemáticas de literatura ou de análise qualitativa de conteúdo. Essa abordagem facilita a análise crítica dos estudos, permitindo identificar os principais conceitos, metodologias, resultados e conclusões apresentados nos trabalhos. Além

disso, avalia a qualidade e consistência dos dados disponíveis. Ainda por meio dos critérios, os discentes podem obter uma visão geral do tema, permitindo-lhes observar e escolher o caminho mais apropriado para suas pesquisas.

A aplicação da TDFab+Arch na academia pode abranger tanto os componentes curriculares da graduação e pós-graduação quanto as pesquisas realizadas na área. Essa aplicação revela a necessidade de novos critérios para a TDFab+Arch. À medida que os estudantes se aprofundam no campo da fabricação digital e conduzem mais pesquisas, surgem novas perspectivas e abordagens que demandam a expansão da taxonomia existente. Essa expansão de critérios reflete o dinamismo e a evolução constante da área. É essencial adaptar a taxonomia para abranger as novas tecnologias, metodologias e aplicações descobertas, garantindo assim que a TDFab+Arch permaneça atualizada e relevante no contexto educacional.

Além disso, conforme pesquisas avançam e as fronteiras da fabricação digital se expandem, novas áreas de estudo e setores podem se beneficiar dessa abordagem. Isso significa que a TDFab+Arch pode ser utilizado também em componentes curriculares interdisciplinares e em aplicações práticas em diferentes campos, além da arquitetura e construção. Essa capacidade de expansão e incorporação de novos componentes e critérios torna ela uma ferramenta dinâmica e em constante evolução.

Também se sugere que a TDFab+Arch seja aplicada em outros catálogos como o *Fabricate* ou ainda nos projetos do SiGraDi ou na rede CuminCAD. O uso dessa taxonomia nesse contexto permite uma abordagem padronizada na descrição e classificação dos projetos, facilitando a compreensão, acesso e comparação entre eles. Os pesquisadores podem utilizar os critérios estabelecidos no na TDFab+Arch como diretrizes para avaliar diferentes aspectos dos projetos, como o processo de fabricação, os materiais utilizados, as técnicas empregadas e as escalas. Essa análise sistemática permite identificar

padrões, tendências e melhores práticas na fabricação digital, além de fornecer perspectivas para o desenvolvimento de novos projetos.

Se utilizar a TDFab+Arch como a ferramenta online, é possível criar uma base de conhecimento abrangente e acessível, onde projetos construídos são classificados e documentados de maneira consistente. Isso auxilia na disseminação do conhecimento e compartilhamento de informações e promove a colaboração entre pesquisadores, profissionais e estudantes da área de fabricação digital. Além de criar um acervo de referências para discentes e pessoas que estão iniciando os estudos na área.

Por fim, sugere-se que futuras pesquisas explorem a expansão e aprimoramento da ferramenta desenvolvida, considerando novos critérios e contextos de aplicação da fabricação digital na arquitetura. Dessa forma, será possível avançar ainda mais no desenvolvimento de uma abordagem abrangente e atualizada para orientar os projetistas na materialização arquitetônica por meio da fabricação digital.

Conclusões

A presente pesquisa teve como objetivo explorar a relação entre a fabricação digital e a materialização arquitetônica, com ênfase no uso de tecnologias de manufatura para transformar ideias em realidade durante o processo de projeto. O principal objetivo foi alcançado, resultando no desenvolvimento de uma ferramenta capaz de auxiliar os projetistas na materialização por meio da fabricação digital.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, foram realizadas análises detalhadas das possibilidades oferecidas pela fabricação digital, bem como das questões e desafios a serem considerados. Com base nessas análises, foi proposta a Taxonomia para

Fabricação Digital aplicada à arquitetura (TDFab+Arch), que representa uma contribuição significativa para a área da arquitetura e a literatura científica. Essa ferramenta fornece critérios e padrões que podem ser utilizados pelos projetistas ao longo do processo de projeto, facilitando a materialização de suas ideias e promovendo eficácia e qualidade nos resultados.

A metodologia adotada, pesquisa construtiva, teve como objetivo principal desenvolver, testar, validar e analisar uma ferramenta destinada a auxiliar os projetistas no processo de exploração da fabricação digital na materialização arquitetônica. Por meio dessa abordagem, foi possível obter um entendimento aprofundado dos aspectos relacionados à aplicação da fabricação digital na materialização arquitetônica. O que culminou na proposição de uma ferramenta adequada às necessidades dos projetistas nesse contexto, capaz de organizar, estruturar os critérios e escolhas inerentes à fabricação digital.

Então, para alcançar esse objetivo, conforme os objetivos específicos da pesquisa, foi identificado e analisada as técnicas de fabricação digital utilizadas na materialização arquitetônica; examinada as classificações existentes na literatura científica para processos de fabricação digital de objetos arquitetônicos, caracterizados os critérios para auxiliar os projetistas nas escolhas relacionadas à fabricação digital. Também foi sintetizada e validada a ferramenta proposta para o auxílio no processo projetual com fabricação digital.

Para isso, realizou-se as revisões sistemáticas de literatura, levantamento das taxonomias relacionadas ao tema da fabricação digital, análise qualitativa de conteúdo e experimentos nos laboratórios da UFPB (Brasil) e do MIT (EUA). Houve também a tradução da ferramenta para o formato *online*. Isso auxiliou os projetistas no uso e na classificação de projetos existentes e futuros. Assim, a síntese e validação dessa

ferramenta foram etapas essenciais para alcançar o objetivo estabelecido.

Ainda nesse contexto, essa tese respondeu à questão de pesquisa proposta "como orientar os projetistas na materialização arquitetônica por meio da fabricação digital?", ao desenvolver uma ferramenta com critérios e conhecimentos relevantes para auxiliar os projetistas nesse processo. Assim, ao utilizar a TDFab+Arch no contexto da fabricação digital é possível contribuir para uma tomada de decisão mais fundamentada e eficaz no contexto da materialização arquitetônica.

A taxonomia desenvolvida neste estudo se destaca das demais estruturas encontradas na literatura científica, pois mapeia de forma abrangente o percurso realizado pelos projetistas na busca pela materialização arquitetônica, considerando todas as etapas e processos envolvidos na fabricação digital. Além disso, é capaz de auxiliar na classificação e organização de projetos concluídos para catalogação. A taxonomia é uma das contribuições originais desta tese.

Além disso, a TDFab+Arch podem auxiliar no avanço do conhecimento, facilitando a colaboração e inspirando a geração de novas ideias e soluções. Assim, novos critérios podem surgir à medida que se avança no campo da fabricação digital e demandando uma constante atualização ou ainda a partir de aplicações em outros contextos, como visualização digital de imagens ou aplicação na realidade virtual. Sendo uma variação para TDFab+design, TDFab+viz ou TDFab+RV, por exemplo.

Os resultados obtidos por meio dessa abordagem metodológica confirmaram a importância da Taxonomia para Fabricação Digital como uma ferramenta capaz de auxiliar os projetistas na compreensão e representação de objetos fabricados digitalmente. Assim, a integração entre a teoria e a prática, juntamente com a utilização adequada das máquinas e técnicas digitais pode possibilitar o aprimoramento da eficácia, qualidade e criatividade nos projetos de fabricação digital. Tornando relevante

o desenvolvimento contínuo da Taxonomia para Fabricação Digital e a sua aplicação em diferentes contextos.

É possível diferentes explorações da TDFab+Arch em componentes curriculares da graduação ou da pós-graduação, na qual pode embasar um processo projetual para a fabricação digital ou ainda levantar discussões a partir da classificação de projetos construídos. Ainda é possível destacar uma das áreas da taxonomia para discutir em sala e buscar soluções que abordem no maquinário, material, escala, superfície ou sobre os modos de fabricação digital ou outros critérios presentes.

Entende-se que o uso da taxonomia nos experimentos da Casa Nordestinha confirmou as hipóteses formuladas, incluindo a ideia de que a fabricação do protótipo utilizando planos seriados em um processo aditivo seria desafiador devido ao tamanho das peças do projeto. Assim, a possibilidade de confirmações ou refutações de hipóteses pode ser uma das discussões levantadas a partir dos critérios dispostos na TDFab+Arch.

Desse modo, ressalta-se que esta pesquisa não esgota todas as possibilidades e desafios relacionados à fabricação digital na arquitetura. A fabricação digital está se tornando cada vez mais popular e acessível, permitindo que projetistas e empreendedores possam criar e desenvolver seus projetos. Isso se deve, em parte, à redução dos preços dos equipamentos e à maior diversidade de opções de acesso e manutenção. Além disso, a fabricação digital oferece maior precisão e qualidade na produção, resultando em custos de produção mais baixos.

Contudo, a utilização da TDFab+Arch, como ferramenta de catalogação possibilita a criação de um acervo de referências que beneficia tanto os estudantes iniciantes na área quanto os profissionais. Esse acervo permite explorar diferentes abordagens, técnicas e soluções inovadoras adotadas por outros projetos, estimulando a criatividade e o desenvolvimento de habilidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKOFF, Russell Lincoln. **Creating the corporate future : plan or be planned for.** [S. l.]: Wiley, 1981. *E-book*. Disponível em: Acesso em: 17 mar. 2023.

AGUDELO, Lina-maría; PAILHES, Jean-pierre Nadeau Jérôme; MEJÍA-GUTIÉRREZ, Ricardo. A taxonomy for product shape analysis to integrate in early environmental impact estimations. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 397–413, 2017.

ARCHDAILY. **Revitalização One Main Office.** [S. l.], 2020. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/789806/one-main-office-renovation-decoi-architects?ad_medium=gallery. Acesso em: 1 out. 2020.

ARCHDAILY BRASIL. **Terminal Internacional de Passageiros de Yokohama.** [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/792391/classicos-da-arquitetura-terminal-internacional-de-passageiros-de-yokohama-foreign-office-architects-foa>. Acesso em: 1 out. 2020.

ASHBY, Michael F. **Materials and the Environment.** [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2013.

ASHBY, Michael F. **Materials selection in mechanical design.** 3. ed. [S. l.: s. n.], 2005-. ISSN 21954364.v. 16

ASHBY, Michael F. **Materials selection in mechanical design: Fourth edition.** 4. ed. Cambridge, UK: [s. n.], 2010. v. 9780080952

ASHBY, Michael F; SHERCLIFF, Hugh; CEBON, David. **Materials: engineering, science, processing and design.** 4. ed. Cambridge, UK: Katey Birtcher, 2019.

ASSUNÇÃO, Rogerio Braga de; COSTA, Adilson Rodrigues da; CÂMARA, Jairo José

Drummond. Materialização de projetos: Uma abordagem metodológica. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, [s. l.], v. 20, n. 16, p. 142–160, 2013.

AUSTERN, Guy; CAPELUTO, Isaac Guedi; GROBMAN, Yasha Jacob. Rationalization methods in computer aided fabrication: A critical review. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 90, n. March 2017, p. 281–293, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.027>.

BAN, Shigeru. **SBA_Tamedia**. [S. l.], 2013. Disponível em: http://www.shigerubanarchitects.com/works/2013_tamedia-office-building/index.html. Acesso em: 15 jun. 2020.

BAX, Thijs; TRUM, Henk. A Building Design Process Model. *Em*: ACHTEN, H. H.; VRIES, DE, B.; HENNESSEY, J. M. (org.). **Design Research in the Netherlands**. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, Fac. Bouwkunde, 2000. p. 19–30.

BAX, Thijs; TRUM, Henk. Faculties of Architecture. [s. l.], n. version, p. 64–75, 2002.

BORGES, Marina Ferreira. Fabricação digital no Brasil e as possibilidades de mudança de paradigma no setor da construção civil. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 79–91, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/ac/a/DvfzQ4WvBVj7k8yYCCCh59XN/?lang=pt>. Acesso em: 26 abr. 2023.

CAMPBELL, Donald T; STANLEY, Julian C. Experimental and quasi-experimental designs for research. *Em*: HANDBOOK OF RESEARCH ON TEACHING. Palo Alto - London: Houghton Mifflin Company, 1963. p. 1–88.

CAMPOS, Maria Luiza de Almeida; GOMES, Hagar Espanha. Taxonomy and Classification: the principle of categorization. **DataGramZero - Revista de Ciência da Informação**, [s. l.], v. 9, p. 1–22, 2008.

CAPONE, Mara; LANZARA, Emanuela. Kerf bending: ruled double curved surfaces

manufacturing. *Em:* , 2018, São Carlos. **xxii congresso da sociedade iberoamericana de gráfica digital**. São Carlos: [s. n.], 2018.

CAPONE, Mara; LANZARA, Emanuela. Parametric Kerf Bending: Manufacturing double curvature surfaces for wooden furniture design. *Em:* DIGITAL WOOD DESIGN. [S. l.]: Springer International Publishing, 2019. p. 415–439. *E-book*. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8_15.

CASA NORDESTE. **CASA NORDESTE 1.0 - Project Manual**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://issuu.com/carlosnome/docs/casa_nordeste_1_pm3_2019-06-12_final/1. Acesso em: 21 ago. 2022.

CHECKLAND, Peter. **Systems Thinking, Systems Practice**. [S. l.]: John Wiley and Sons, 1981. *E-book*. Disponível em: https://www.amazon.com/-/pt/dp/B00F3UDMLQ/ref=sr_1_2?__mk_pt_BR=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=TI8K5CVY509A&keywords=systems+thinking+checkland&qid=1679150305&prefix=systems+thinking+checkland%2Caps%2C182&sr=8-2. Acesso em: 17 mar. 2023.

CHEN, Lujie; SASS, Lawrence. Fresh Press Modeler: A generative system for physically based low fidelity prototyping. **Computers and Graphics (Pergamon)**, [s. l.], v. 54, p. 157–165, 2016. Disponível em: Acesso em: 20 mar. 2020.

CHUA, C.K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. **Fundamentals of Rapid Prototyping**. 2nd. ed. [S. l.]: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003. *E-book*. Disponível em: Acesso em: 20 abr. 2020.

COOLEY, Mike. Human centred systems: An urgent problem for systems designers. **AI & Society**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 37–46, 1987. Disponível em: <https://philpapers.org/rec/COOHCS>. Acesso em: 16 mar. 2023.

COOPER, K.G. **Rapid Prototyping Technology: Selection and Application**. [S. l.: s. n.],

2001. *E-book*. Disponível em: Acesso em: 20 abr. 2020.

COOPER, Harris; HEDGES, Larry V.; VALENTINE, Jeffrey C. **HANDBOOK OF RESEARCH SYNTHESIS AND META-ANALYSIS**. 3. ed. [S. l.]: Russell Sage Foundation, 2019.

CURT. Collaboration, Integrated Information and the Project Lifecycle in Building Design, Construction and Operation . *Em:* , 2004. **The construction users roundtable**. [S. l.:s. n.], 2004.

DBT, Digital Building Technologies. **Digital Bamboo - dbt**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://dbt.arch.ethz.ch/project/digital-bamboo/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP, DDF MIT. **Digitally Fabricated House for New Orleans**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://ddf.mit.edu/news/2014/project-summary>. Acesso em: 29 nov. 2020.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP, DDF. **H22 Shelter Design**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://ddf.mit.edu/node/90>. Acesso em: 22 abr. 2023.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP; SASS, Larry. **Digital Design Fabrication Group, DDF**. [S. l.], 2023. Disponível em: <http://ddf.mit.edu/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

DUNN, Nick. **Digital Fabrication in Architecture**. Edição: 01ed. London: Laurence King, 2012.

FAATZ, Stefan. Architectural programming: providing essential knowledge of project participants needs in the pre-design phase. **Organization, technology and management in construction: An international journal**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 1–6, 2009.

FELIPE, Barbara L.; NOME, Carlos. Digital Fabrication Techniques: A systematic literature review. *Em:* , 2020, Colombia, Medellin. **XXIV Congresso Iberoamericano de Gráfica Digital, SIGRADI**. Colombia, Medellin: Blucher Design Proceedings, 2020. p. 9–16. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/digital->

fabrication-techniques-a-systematic-literature-review-35347.

FRAUNHOFER ISST. **Guidelines and Good Practices for taxonomies Semantic Interoperability Centre Europe**. [S. l.: s. n.], 2009.

FRIEDMAN, Ken. Theory construction in design research: criteria: approaches, and methods. **Design Studies**, [s. l.], v. 24, n. 6, Common {Ground}, p. 507–522, 2003. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142694X03000395>. Acesso em: 4 maio 2019.

GALINARI, Ana Flávia; INO, Akemi. Procedimentos para a escolha de sistemas construtivos em madeira de plantios florestais destinados à habitação social. *Em*, 2004, São Paulo. **I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**. São Paulo: [s. n.], 2004.

GEBHARDT, Andreas. **Understanding Additive Manufacturing**. [S. l.]: Hanser Publishers, 2011-. ISSN 03511871. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9783446425521500021>. Acesso em: 20 abr. 2020.

GRIZ, Cristiana; QUEIROZ, Natália; NOME, Carlos. Edificação Modular: Estudo de caso e protótipo de um sistema construtivo e código aberto utilizando prototipagem rápida. *Em*, 2017, Concepción, Chile. **XXI Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital**. Concepción, Chile.: [s. n.], 2017.

HERSHBERGER, Robert. **Architectural Programming and Predesign Manager**. 1 edition. Abingdon: Routledge, 1999.

HOFFER, Brian *et al.* **KERF PAVILION – MIT | FuturesPlus**. [S. l.], 2012. Disponível em: <https://futuresplus.wordpress.com/2012/07/18/kerf-pavilion-mit/>. Acesso em: 18 abr.

2023.

IWAMOTO, Lisa. **Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques**. 144 p. edied. New York: Princeton Architectural Press, 2009.

JACOBS, Paul F. **Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography**. [S. l.]: McGraw-Hill, 1992.

JONES, David R. H.; ASHBY, Michael F. **Engineering Materials 1 An Introduction to Properties, Applications and Design**. 5. ed. Cambridge, UK: Katey Birtcher, 2012.

KALAY, Yehuda E. **Architecture's New Media: Principles, Theories and Methods of Computer-Aided Design**. Cambridge, MA: MIT Press, 2004. *E-book*. Disponível em: <http://www.immersence.com/publications/2004/2004-YKalay-full.html>. Acesso em: 3 jul. 2022.

KASANEN, Eero; LUKKA, Kari; SIITONEN, Arto. Journal of Management Accounting Research. **The Constructive Approach in Management Accounting Research**, [s. l.], v. 5, p. 243–264, 1993.

KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. Edição: 1ed. New York; London: Taylor & Francis Group, 2003.

KOLAREVIC, Branko. Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age. *Em*: REINVENTING THE DISCOURSE, 2001, Buffalo, NY. **Reinventing the discourse - How digital tools help bridge and transform research, education and practice in architecture: Proceedings of the twenty first annual conference of the association for computer-aided design in architecture**. Buffalo, NY: Association for Computer-Aided Design in Architecture, 2001. p. 268–278.

KONTOVOURKIS, Odysseas; PHOCAS, Marios C.; KATSAMBAS, Constantinos. Digital to physical development of a reconfigurable modular formwork for concrete casting and

assembling of a shell structure. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 106, 2019.

KOSKELA, Lauri. **Lean Construction**. *Em:* , 1998, Florianópolis. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Florianópolis: ANTAC, 1998.

KOWALTOWSKI, Doris K *et al.* **O Processo de Projeto em Arquitetura: da Teoria à Tecnologia**. Edição: 1ªed. [S. l.]: Oficina de Textos, 2011.

KRIPPENDORFF, Klaus. **Content analysis: an introduction to its methodology**. 2. ed. [S. l.]: Sage Publications, 2004.

LANZARA, EMANUELA. **PANELING COMPLEX SURFACES RAZIONALIZZAZIONE DI SUPERFICI COMPLESSE PER L'INDUSTRIALIZZAZIONE UNIVERSITÀ**. 2015. 180 f. Doutorado (Arquitetura e urbanismo) - UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II - DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA, [s. l.], 2015.

LAWSON, Bryan. **Como arquitetos e designers pensam**. [S. l.]: Oficina de Textos, 2011. *E-book*. Disponível em: Acesso em: 3 dez. 2021.

LUKKA, Kari. **The Constructive Research Approach**. *Em:* OJALA, Lauri; HILMOLA, Olli-Pekka (org.). **Case study research in logistics**. [S. l.]: Publications of the Turku School of Economics and Business Administration, 2003. p. 83–101. *E-book*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/247817908_The_Constructive_Research_Approach. Acesso em: 3 maio 2019.

MAHFUZ, Edson da Cunha. **Ensaio sobre a razão compositiva**. UFV/AP: [s. n.], 1995. *E-book*. Disponível em: Acesso em: 5 jan. 2022.

MANOGHARAN, Guha *et al.* **AIMS – A Metal Additive-hybrid Manufacturing System: System Architecture and Attributes**. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 1, p. 273–286, 2015. Disponível em: Acesso em: 13 abr. 2023.

MASCARÓ, Juan Luis. **O Custo das decisões arquitetônicas**. 5. ed. Porto Alegre:

Masquatro, 2010.

MORANDI, Maria Isabel W. Motta;; CAMARGO, Luis F. Riehs. Revisão sistemática da literatura. *Em*: DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel P.;; ANTUNES JR, José A. Valle (org.). **Design Science Research. Método de Pesquisa Para Avanço da Ciência e Tecnologia**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

MOZOTA, Brigitte Borja. **Design Management: Using Design to Build Brand Value and Corporate Innovation**. 1. ed. [S. l.]: Allworth, 2003. *E-book*. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Design-Management-Corporate-Innovation-English-ebook/dp/B006QZ77MM>. Acesso em: 16 mar. 2023.

NICHOLAS, Paul *et al.* Concepts and Methodologies for Multiscale Modeling A Mesh-Based Approach for Bi-Directional Information Flows. *Em*: , 2016. **ACADIA - Post Human Frontiers**. [S. l.: s. n.], 2016. p. 308–316.

OXMAN, Neri. Age of Entanglement. **Journal of Design and Science**, [s. l.], 2016. Disponível em: <https://jods.mitpress.mit.edu/pub/ageofentanglement/release/1>. Acesso em: 11 fev. 2023.

OXMAN, R. DIGITAL DESIGN THINKING: IN THE NEW DESIGN IS THE NEW PEDAGOGY. *Em*: , 2006. **CAADRIA proceedings**. [S. l.: s. n.], 2006. p. 37–46. Disponível em: Acesso em: 15 mar. 2023.

OXMAN, Rivka. Informed tectonics in material-based design. **Design Studies**, [s. l.], v. 33, n. 5, p. 427–455, 2012.

OXMAN, Rivka. MFD: Material-Fabrication-Design: A Classification of Models from Prototyping to Design. **Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures**, [s. l.], n. August, 2015.

OXMAN, Rivka. Performance-Based Design: Current Practices and Research Issues.

<http://dx.doi.org/10.1260/147807708784640090>, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 1–17, 2008.

Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/147807708784640090>. Acesso em: 15 mar. 2023.

OXMAN, Rivka. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. **Design Studies**, [s. l.], v. 52, p. 4–39, 2017.

OXMAN, Rivka.; OXMAN, Robert. **The new structuralism: design, engineering and architectural technologies**. [S. l.]: Wiley, 2010. *E-book*. Disponível em: Acesso em: 3 dez. 2019.

OXMAN, Neri;; ROSENBERG, Jesse Louis; Material-based Design Computation: an Inquiry into Digital Simulation of Physical Material Properties as Design Generators. **International Journal of Architectural Computing** 5, [s. l.], v. 5, n. 1, IJAC, p. 26–44, 2007. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1260/147807707780912985>. Acesso em: 29 abr. 2019.

PATEL, Sanket; LASLEY, Joseph. Is Leadership Antidisciplinary? A Krebs Cycle of Creativity Approach With Game-Based Applications. **Journal of Leadership Accountability and Ethics** , [s. l.], v. 18, n. 2, p. 1–7, 2021.

PEÑA, William M; PARSHALL, Steven A. **Problem Seeking: An Architectural Programming Primer**. Edição: 4ted. New York: John Wiley & Sons, 2001.

PORTER, Keith A. A Taxonomy of Building Components for Performance-Based Earthquake Engineering. [s. l.], n. September, 2005.

PUPO, Regiane Trevisan. Ensino da prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção no Brasil: definições e estado da arte. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 19, 2008. Disponível em: Acesso em: 24 abr. 2020.

PUPO, Regiane Trevisan; CELANI, Maria Gabriela Caffarena. **TÉCNICAS DE PROTOTIPAGEM DIGITAL PARA ARQUITETURA**. *Em:*, 2009, Bauru. **Graphica**. Bauru: [s. n.], 2009.

ROMCY, Neliza Maria e Silva. **Abordagem paramétrica e ensino de projeto: proposição de diretrizes metodológicas, considerando estratégias curriculares e o atelier de projeto**. 2017. Tese (Doutorado) Arquitetura e Urbanismo - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/24131>. Acesso em: 22 abr. 2019.

SASS, Lawrence. Invited commentary - The next revolution: digital building kits: materialising designs with digital fabrication. *Em:*, 2010, Hong Kong. **Proceedings of the 15th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia / Hong Kong**. Hong Kong: [s. n.], 2010. p. 545–553. Disponível em: Acesso em: 26 abr. 2020.

SASS, Larry. **Notas de aula**. Cambridge: [s. n.], 2022.

SASS, Lawrence. Synthesis of design production with integrated digital fabrication. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 298–310, 2007.

SASS, Lawrence; BOTHA, Marcel. The Instant House: A Model of Design Production with Digital Fabrication. **International Journal of Architectural Computing**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 109–123, 2006. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1260/147807706779399015>.

SASS, Lawrence; OXMAN, Rivka. Materializing design: The implications of rapid prototyping in digital design. **Design Studies**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 325–355, 2006. Disponível em: Acesso em: 4 abr. 2020.

SCHEEREN, Rodrigo. **Fabricação digital na América do Sul: laboratórios, estratégias,**

processos e artefatos para o design, a arquitetura e a construção. 2022. - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102132/tde-05042022-173034/>. Acesso em: 27 abr. 2023.

SCHEEREN, Rodrigo; HERRERA, Pablo C.; SPERLING, David. M. **Homo Faber 2.0: politics of digital in Latin America.** São Carlos: [s. n.], 2018.

SCHON, Donald A. **Educando o Profissional Reflexivo: Um Novo Design para o Ensino e a Aprendizagem.** 1. ed. [S. l.]: Penso, 2000. *E-book*. Disponível em: Acesso em: 4 dez. 2021.

SMITH, Valerie *et al.* Methodology in conducting a systematic review of systematic reviews of healthcare interventions. **BMC Medical Research Methodology**, [s. l.], v. 11, 2011.

SPERLING, David M.; HERRERA, Pablo C. **Homo faber: digital fabrication in latin america CAAD FUTURES 2015> the next city.** São Carlos - SP: São Carlos: Instituto de Arquitetura e Urbanismo, 2015.

SPERLING, David M; HERRERA, Pablo C.; SCHEEREN, Rodrigo. Fabricating (Other) Computations: Digital Fabrication and Technological Appropriation in Latin America. **Dearq**, [s. l.], n. 27, p. 76–87, 2020.

STACEY, Michael; BEESLEY, Phillip;; HUI, Vicent; **Digital Fabricators.** Toronto: [s. n.], 2005.

STUDIO, FAULDERS. **AIRSPACE TOKYO.** [S. l.], 2020. Disponível em: <https://fauldersonstudio.com/AIRSPACE-TOKYO>. Acesso em: 1 out. 2020.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003. Disponível em: Acesso

em: 13 mar. 2020.

TRUM, H.M.G.J.; BAX, M.F.TH. The taxonomy of concepts in architecture: some applications and developments. **Open House International**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 4–14, 1996. Disponível em: <https://research.tue.nl/en/publications/the-taxonomy-of-concepts-in-architecture-some-applications-and-developments>.

VASSÃO, Caio Adorno. Metadesign: ferramentas, estratégias e ética para a complexidade. **São Paulo: Blucher**, [s. l.], p. 61, 2010. Disponível em: Acesso em: 15 mar. 2023.

VROUWE, Ivo. **Sensemaking in Construction The Necessity of Making**. 2018. 424 f. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo - Katholieke Universiteit Leuven, [s. l.], 2018.

VROUWE, Ivo; SWIETEN, Peter van. Reframing structures. *Em:* , 2013. **Structures and Architecture**. [S. l.: s. n.], 2013. p. 1295–1302.

WHITTAKER, Mary; BREININGER, Kathryn. Taxonomy Development for Knowledge Management. *Em:* , 2008, Quebec, CA. **WORLD LIBRARY AND INFORMATION CONGRESS: 74TH IFLA GENERAL CONFERENCE AND COUNCIL**. Quebec, CA: [s. n.], 2008. p. 1–10. Disponível em: <http://www.ifla.org/IV/ifla74/index.htm>.

WOODBURY, Robert Francis. **Elements of parametric design**. 1. ed. [S. l.]: Routledge, 2010. *E-book*. Disponível em: <https://libgen.is/book/index.php?md5=C406DDB3A218E8EADB3FF1C702A9E797>. Acesso em: 29 nov. 2019.

GLOSSÁRIO

CRITÉRIO	Conjunto de padrões para avaliar ou decidir algo com base em fatores específicos e de contexto aplicados;
DESIGN	Processo criativo que busca encontrar soluções para problemas específicos, e pode ser um sinônimo para o processo de projeto de arquitetura.
ESTABILIDADE	Aborda a capacidade de um objeto de conservar sua forma e função;
FABRICABILIDADE	Conjunto de técnicas para fabricar um objeto arquitetônico;
FABRICAÇÃO	Uma das etapas necessárias para a materialização arquitetônica, na qual há transformação de matérias-primas em um objeto final;
FERRAMENTA	Recursos desenvolvidos para visualizar projetos, no qual permite análises para apresentação de informações de forma clara;
MATERIALIZAÇÃO	Processo completo desde a concepção até a realização física, na qual utilizam técnicas e processos específicos;
MÉTODOS	Forma de estruturar o pensamento a partir das sequências de passos para cada etapa do processo;
PROCESSOS	Na visão de macro é o conjunto de etapas que são planejadas para transformar algo ou aplicada à um objeto;
PROJETISTAS	Os profissionais responsáveis pelo processo projetual de um objeto;
TAXONOMIA	Sistemas que organizam informações para uma análise eficaz e complexas com padrões e diretrizes que orientem o projeto;
TÉCNICAS	Habilidades e ferramentas específicas para realizar etapas específicas;
USABILIDADE	Refere-se à facilidade em utilizar e interagir com um objeto.