



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Escola Superior de Desenho Industrial

Tom Ferreira Caminha

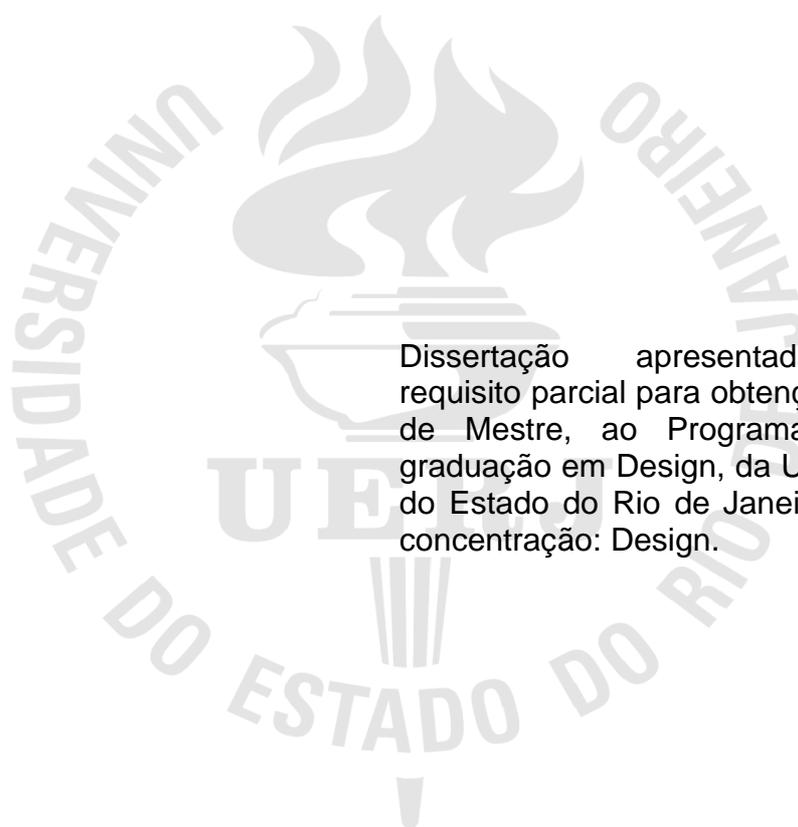
**A prototipagem física de alta fidelidade: uma abordagem de design
para projetos na construção civil**

Rio de Janeiro

2020

Tom Ferreira Caminha

A prototipagem física de alta fidelidade: uma abordagem de design para projetos na construção civil



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Design, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Design.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ligia Maria Sampaio de Medeiros

Rio de Janeiro

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/G

C183 Caminha, Tom Ferreira.

A prototipagem física de alta fidelidade : uma abordagem de design para projetos na construção civil / Tom Ferreira Caminha . - 2020.

181 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Ligia Maria Sampaio de Medeiros.

Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Escola Superior de Desenho Industrial.

1. Prototipagem física - Teses. 2. Protótipos - Teses. 3. Construção civil - Teses. 4. Arquitetura - Teses. 5. Desenho (Projetos) - Teses. I. Medeiros, Ligia Maria Sampaio de. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Escola Superior de Desenho Industrial. III. Título.

CDU 004.414.32

Bibliotecária: Marianna Lopes Bezerra CRB7/6386

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Tom Ferreira Caminha

A prototipagem física de alta fidelidade: uma abordagem de design para projetos na construção civil

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Design, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Design.

Aprovada em 02 de abril de 2020.

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Ligia Maria Sampaio de Medeiros (Orientadora)
Escola Superior de Desenho Industrial - UERJ

Prof. Dr. André Ribeiro de Oliveira
Escola Superior de Desenho Industrial – UERJ

Prof. Dr. Andres Martin Passaro
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2020

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à memória do meu professor, mentor e amigo
Eduardo Mendes de Vasconcellos. O “Eu” vira sonho, mas os
ensinamentos permanecem um pouco mais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha companheira, Julia, por me apoiar e aturar a minha ansiedade e falta de tempo durante todo o processo do mestrado, inclusive durante a gestação de nosso filho, Francisco.

Seria impossível não agradecer aos meus professores na ESDI, Washington, André, João e, principalmente, minha orientadora Lúcia por todo o conhecimento que me passaram, as palavras de conselho, de apoio e mesmo de discordância. Fico cada vez mais convicto que o fator mais importante na educação é a qualidade dos educadores.

Gostaria ainda de agradecer aos meus colegas e amigos, tanto da ESDI quanto da UFF e outros círculos, pelas conversas corriqueiras, mas que muitas vezes são as melhores fontes de reflexão. Frequentemente os *insights* mais relevantes vêm de conversas informais em uma mesa de bar.

*Por fim, gostaria de agradecer ao professor Blair Satterfield, meu orientador na UBC, por seu apoio, atenção e amizade durante o tempo que estive no Canadá. Infelizmente, não concluí o trabalho objetivo de sua orientação, porém os seus conselhos ainda assim me ajudaram muito e, com certeza, uma parcela deles está presente nessa dissertação.

**Lastly, I would like to thank Professor Blair Satterfield, my thesis supervisor at UBC, for his support, attention and friendship during my time in Canada. Unfortunately, I didn't conclude the objective of your efforts, however your counseling still helped me very much and part of it is surely present in this research.*

As aquisições não ocorrem pelo estudo de regras e leis, como, às vezes se crê, mas sim pela experiência. Estudar primeiro regras e leis é colocar o carro à frente dos bois.

Célestin Freinet

Acima de tudo, não deveria haver projetos utópicos. A evolução só pode prosseguir sobre a força da verificação, sua única fonte.

Jean Prouvé

RESUMO

CAMINHA, Tom F. *A prototipagem física de alta fidelidade: uma abordagem de design para projetos na construção civil*. 2020. 181 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola Superior de Desenho Industrial, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Foi realizada, na presente dissertação, uma revisão da literatura que trata da prototipagem enquanto abordagem projetual no desenvolvimento de produtos e, também, uma análise desse arcabouço teórico levantado sob a ótica de sua aplicabilidade em projetos da Construção Civil. Esse setor historicamente apresenta altas taxas de ineficiência, desperdício de materiais e de retrabalho e, de um modo geral, baixos índices de produtividade quando comparado a outras indústrias. Buscou-se estudar uma abordagem projetual típica, e mesmo indispensável, aos setores mais industrializados, porém rara na Construção Civil: a **prototipagem física de alta fidelidade**. Ao levantar e analisar a produção acadêmica que trata do emprego de protótipos em processos projetuais logo foi constatado que quase não há estudos sobre o tema nas disciplinas associadas à Construção e a bibliografia mais relevante é justamente oriunda de áreas de conhecimento associadas aos setores mais industrializados. Entende-se que não há atualmente bases conceituais abrangentes e firmemente estabelecidas sobre o uso de protótipos enquanto abordagem projetual na Construção Civil e nas áreas de conhecimento associadas a ela. Dessa forma, o objetivo central desta dissertação é abordar as seguintes questões: **O que são “protótipos”? Como a “prototipagem” é empregada em processos projetuais, em geral, e na Construção Civil em específico? Qual a relevância dela para esses processos e de que forma difere de outras técnicas projetuais da Construção?** Após a revisão da literatura sobre o tema, fez-se uma análise, através do enquadramento teórico estabelecido na bibliografia levantada, dos métodos de representação tradicionalmente empregados em projetos da Construção e de alguns excepcionais casos em que se empregou a prototipagem física de alta fidelidade. Por fim, propôs-se uma série de reflexões teóricas a respeito das definições, classificações e conceitos estudados e foram enumeradas algumas linhas de pesquisa possíveis que podem ser desenvolvidas a partir dos conteúdos abordados no presente estudo.

Palavras-chave: Protótipo. Prototipagem. Construção Civil. Arquitetura. *Design Methods*. Metodologia de Projeto.

ABSTRACT

CAMINHA, Tom F. *High-fidelity physical prototyping: a design approach for construction projects*. 2020. 181 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola Superior de Desenho Industrial, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

This dissertation presents a literature review on prototyping as a design approach in product development and an analysis of its applicability in Construction projects. The Construction Industry has historically presented high rates of material and labor waste and, in general, low productivity indicators when compared to other industries. Thus, this research focused on a typical, and even indispensable, design approach in more industrialized sectors, but rare in Construction: **high-fidelity physical prototyping**. When surveying and analyzing the academic production that deals with the use of prototypes in design processes, it was soon found that there are almost no studies on the subject in the disciplines associated with Construction, and the most relevant bibliography comes precisely from areas of knowledge associated with the most industrialized sectors. Apparently, there are currently no comprehensive and firmly established conceptual bases on the use of prototypes as a design approach in the Construction Industry and in the areas of knowledge associated with it. Thus, the main objective of this dissertation is to address the following questions: **What are “prototypes”? How is “prototyping” used in design processes, in general, and in Construction in particular? How relevant is it to these processes and how does it differ from other design techniques in Construction?** After reviewing the literature on the subject, an analysis was made, using the theoretical framework established in the bibliography, of the representation methods traditionally used in Construction projects and of some exceptional cases in which high-fidelity physical prototyping was used. Finally, a series of theoretical reflections on the definitions, classifications and concepts studied were proposed and some possible lines of research that could be developed from the contents covered in this study were enumerated.

Keywords: Prototype. Prototyping. Construction. Architecture. Design Methods. Project Methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Dois automóveis Mercedes-Benz em frente às Casas Weissenhof - 1927 e 1977.	33
Figura 2	– <i>Designers</i> da Ford criando um protótipo de argila do <i>Mustang I</i> (1962).....	42
Figura 3	– “Protótipo de papel” usado no projeto da interface digital de um aplicativo para <i>smartphone</i>	44
Figura 4	– Exemplos de protótipos físicos usados em um projeto da iRobot	48
Figura 5	– Exemplos de protótipos analíticos usados em um projeto da iRobot	48
Figura 6	– Versões do projeto de roda e um <i>protótipo</i> após um teste	50
Figura 7	– Três <i>protótipos</i> de um <i>software</i> de desenho de ambientes em 3D ...	55
Figura 8	– <i>Storyboard</i> que demonstra o papel de um novo <i>notebook</i> com manuseio por toque.....	58
Figura 9	– Dois protótipos, de graus de resolução diferentes, expõem o papel de produtos propostos.....	59
Figura 10	– Dois protótipos de aparência e manuseio do GloBall.....	60
Figura 11	– Protótipo de implantação de um software de edição de vídeos	62
Figura 12	– Um produto e três protótipos que filtram aspectos diferentes para o desenvolvimento	64
Figura 13	– Planta-baixa original da casa e desenhos da planta feita por participantes do estudo	66
Figura 14	– Protótipos geram um modelo mental comum.....	70
Figura 15	– Protótipos de bota de neve infantil	71
Figura 16	– Protótipo em escala 1/10, para ensaios acústicos, e outro em escala real de um trecho de fachada – <i>Walt Disney Concert Hall</i> (2003) e Museu Guggenheim de Bilbao (1997).....	77

Figura 17	– A invenção do <i>speedee service system</i> dos irmãos McDonald: “protótipo focado” ou “protótipo / filtro” para o design de uma cozinha industrial e sua logística de operação.....	81
Figura 18	– Croquis e Planta-Baixa - Biblioteca de Rovaniemi (Alvar Aalto,1963)	86
Figura 19	– Diagrama Acústico - Auditório da Biblioteca de Viipuri (Alvar Aalto, 1927-1935)	87
Figura 20	– Diagramas de iluminação - Biblioteca de Viipuri (Alvar Aalto, 1927-35)	87
Figura 21	– Diagrama estrutural – Auditório da Sede da UNESCO (Pier Luigi Nervi, 1953-58)	88
Figura 22	– Diagrama de composição formal – <i>VIA 57 West</i> (Bjarke Ingels Group, 2010-2016)	89
Figura 23	– Páginas do Memorial do Concurso de Brasília (Lúcio Costa, 1956) .	90
Figura 24	– Fluxograma de ambientes – Museu de Ciências (Caminha, Enoque e Thurler, 2010)	91
Figura 25	– Maquetes de exploração/geração de formas - Instituto de Farmacêuticos Hospitalares (Herzog & de Meuron, 1995-98)	94
Figura 26	– Maquete de estudo de materialidade - Casa de Madeira (Herzog & de Meuron, 1995)	95
Figura 27	– Maquetes colaborativas de exploração/geração - Conjunto MCMV Nova Esperança (Arché Projetos, 2016).....	96
Figura 28	– Maquete de comunicação - Getty Center (Richard Meier, 1997)	98
Figura 29	– Maquete-detalle – New York Times Building (Renzo Piano BW, 1995-1998)	99
Figura 30	– Corte e maquete de ensaio acústico - Igreja em Vuoksenniska (Alvar Aalto, 1956-1959)	100
Figura 31	– Maquete de ensaio em túnel de vento – Hospital Sarah Belém (João F. Lima, 2007).....	101

Figura 32	– Reconstrução de um modelo de correntes e pesos pendurados de Antoni Gaudí	102
Figura 33	– Ensaio laboratorial de resistência a compressão de um corpo-de-prova de concreto (esquerda) e ensaio de carga in loco de um guarda-corpo (direita).....	102
Figura 34	– Ensaio de carga sobre pilar estrutural – Escritórios Johnson Wax (Frank L. Wright, 1950).....	103
Figura 35	– Projeto e dimensionamento de uma viga vagonada para ensaio laboratorial.....	104
Figura 36	– Simulação computacional do funcionamento estrutural da viga vagonada.....	105
Figura 37	– Construção e ensaio de carga de um exemplar físico da viga vagonada.....	105
Figura 38	– Modelo BIM de uma edificação com a integração de diversas disciplinas projetuais	107
Figura 39	– Simulação virtual da iluminância de um ambiente.....	108
Figura 40	– Corte de uma simulação computacional de dinâmica de fluidos (CFD) de uma edificação.....	109
Figura 41	– Simulação 4D da sequência de uma obra.....	109
Figura 42	– Protótipos de habitação mínima no Quênia.....	117
Figura 43	– Protótipos completos de abrigos emergenciais	118
Figura 44	– Protótipo completo – <i>Maison B.L.P.S.</i> (J. Prouvé, E. Beaudouin, M. Lods, 1935)	119
Figura 45	– Montagem de um protótipo completo (esquerda) e uma casa implantada (direita) para o Ministério da Reconstrução	120
Figura 46	– Protótipo completo de casa pré-fabricada (1949).....	121
Figura 47	– Protótipo completo da <i>Maison Coques</i> no <i>Salon Arts Menagers</i> (1952).....	122

Figura 48	– Montagem de protótipo completo em fábrica – Casa para o Saara: modelo com esquis para transporte sobre areia (1958)	123
Figura 49	– Protótipo completo – Casa para o Saara (1958).....	123
Figura 50	– Protótipo completo em construção e pronto – <i>Maison Abbé Pierre</i> (1956)	124
Figura 51	– <i>Maison Tropicale</i> (1949)	125
Figura 52	– Maquete dos componentes usados nas Casas para o Saara (1958)	126
Figura 53	– Projeto e fabricação de protótipo de um sistema de fachada leve de chapas de alumínio (M Villinger, M. Silvy, J. Prouvé, 1949)	126
Figura 54	– Protótipo completo - Habitação Mínima <i>Diogene</i> (Renzo Piano BW, 2013).....	127
Figura 55	– Sistemas e componentes - Habitação Mínima <i>Diogene</i> (Renzo Piano BW, 2013).....	128
Figura 56	– <i>Showroom</i> de casa pré-fabricada em madeira – Modelo Bariloche (Solução Casas)	129
Figura 57	– Protótipo completo – Escola Transitória Rural (João F. Lima, 1982-1984).....	130
Figura 58	– O sistema de componentes modularizados da Escola Transitória Rural	131
Figura 59	– Escolas rurais para 50, 70, 120 e 160 alunos, todas executáveis com o mesmo sistema de componentes.....	132
Figura 60	– Fábrica de componentes de Abadiânia, GO, e Lelé inspecionando uma viga sendo feita.....	132
Figura 61	– Escola, creche, centro comunitário e mobiliário urbano construídos com os componentes modularizados de argamassa armada.	133
Figura 62	– Protótipo de cobertura com <i>sheds</i> – Hospital de Taguatinga (João F. Lima, 1988).....	134
Figura 63	– Oficina metalúrgica do Centro de Tecnologia da Rede Sarah	135

Figura 64	– Setores do Centro de Tecnologia Rede Sarah	135
Figura 65	– Evolução dos <i>sheds</i> dos Hospitais Sarah	136
Figura 66	– Aplicação de painéis de paredes e esquadrias na <i>Maison Jean Prouvé</i> (1954).....	138
Figura 67	– Maquetes de um sistema de módulos para construção de edifícios multifamiliares de vários andares (J. Boutemain, Friederich, J. Prouvé, 1951).....	139
Figura 68	– Fabricação de diversos painéis metálicos de paredes	140
Figura 69	– Sistema de painéis de fachada utilizado nas escolas de Sarcelles, Grenoble, St- Egreve a Faverges.....	141
Figura 70	– Protótipo de sistema de pilares metálicos e aplicação do sistema no Centro de Pesquisas Oceanográficas de Nantes.....	141
Figura 71	– Protótipo de sistema de fachada envidraçada desenvolvido para a <i>Maison du Peuple</i> de Clichy, Paris (1938-1939)	142
Figura 72	– Protótipo e obra completa – Centro Cultural Jean-Marie Tjibaou (Renzo Piano BW, 1998).....	143
Figura 73	– Montagem de protótipo de arco e pavilhão completo – IBM <i>Travelling Exhibition Pavilion</i> (Renzo Piano BW, 1982-84)	144
Figura 74	– <i>Mock-up</i> de envoltória – Campus do Citizens Bank (Elkus Manfredi Architects, 2017)	146
Figura 75	– Ensaio de resistência á água de um <i>mock-up</i> de uma fachada	147
Figura 76	– Construção e <i>mock-up</i> de fachada – <i>Brock Commons</i> (Acton Ostry Architects, 2017)	147
Figura 77	– <i>Mock-up</i> de estrutura pré-fabricada de madeira – <i>Brock Commons</i> (Acton Ostry Architects, 2017).....	148
Figura 78	– <i>Mock-up</i> de parte de um pavimento – <i>PNC Plaza</i> (Gensler, 2015)...	148
Figura 79	– <i>Mock-up</i> de parte de um pavimento – <i>New York Times Building</i> (Renzo Piano BW, 1995-1998).....	149

Figura 80	– Protótipo de parede cortina com janelas de abertura pantográfica, desenvolvido por alunos do Laboratório de Desenvolvimento de Produtos – TU Delft	151
Figura 81	– Alunos em um curso <i>design-build</i> da UBC	152
Figura 82	– O aluno Conor Denison construindo seu abrigo na Escola de Arquitetura de Taliesin.....	153
Figura 83	– Alunos do <i>Rural Studio</i> construindo uma casa para uma família local	154
Figura 84	– Alunos construindo protótipos no canteiro experimental da PUC de Campinas.....	155
Figura 85	– Edificação de taipa construída no canteiro experimental da UFMS..	155
Figura 86	– Alunos desenvolvendo exercícios nas disciplinas de canteiro experimental na FAU-USP.....	156
Figura 87	– Construção de protótipo - Casa Revista (Clarice Rohde, Laboratório de Modelos e Fabricação Digital - UFRJ, 2015)	158
Figura 88	– “Quando tudo que se tem é um martelo, todo problema parece um prego”	173

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Comparação entre a variação dos PIBs Nacional e da Construção Civil	27
Gráfico 2	– Comparação entre produtividades de indústrias brasileiras	29
Gráfico 3	– Comparação entre produtividades da cadeia da Construção Civil .	30
Gráfico 4	– Produtividade das indústrias nos EUA de 1950-2012	32
Gráfico 5	– Tipos de <i>protótipos</i> classificados de acordo com seus graus de <i>abstração</i> e abrangência	49
Gráfico 6	– Uso de <i>protótipos abrangentes</i> em relação ao seu custo e ao risco dos tipos de projeto.....	52
Gráfico 7	– Modelo do que protótipos “prototipam”	55
Gráfico 8	– Três protótipos do software de planejamento de ambientes plotados no modelo proposto	56
Gráfico 9	– Os três papéis dos protótipos.....	69
Gráfico 10	– Categorização dos Métodos de Produção Automatizada.....	78
Gráfico 11	– Nível de Fidelidade e a progressão de projetos na classificação de Ulrich e Eppinger	83
Gráfico 12	– Quadrantes de classificação geral de representações.....	84
Gráfico 13	– Representações abstratas e focadas: as ferramentas mais usuais da Construção Civil	85
Gráfico 14	– Gráfico de Gantt de um cronograma de obra	92
Gráfico 15	– Modelo simplificado das etapas de processos de <i>design</i>	92
Gráfico 16	– Maquetes e ensaios: as representações físicas mais comuns na Construção Civil	93
Gráfico 17	– Protótipos virtuais: abstratos, mas abrangentes.....	110

Gráfico 18 – A dificuldade em atingir a alta fidelidade em projetos na Construção Civil.....	112
Gráfico 19 – O uso de protótipos abrangentes em função de seu custo e os riscos inerentes aos projetos	113
Gráfico 20 – Taxa de sobrevivência das empresas de 2 anos, por setor produtivo, em 2008	115
Gráfico 21 – Representações físicas e abrangentes: protótipos	116
Gráfico 22 – Sistema de classificação de Houde e Hill e tipos gerais de protótipos de Chartier e Badev	163
Gráfico 23 – Sistema de classificação de Ulrich e Eppinger com tipos gerais de Chartier e Badev	164
Gráfico 24 – O nível de fidelidade das representações tende a aumentar ao longo das etapas dos processos projetuais	165
Gráfico 25 – Sistema de classificação de Ulrich e Eppinger, com representações da Construção Civil agrupadas em categorias gerais	166
Gráfico 26 – Prototipagem física: campo de estudo ainda pouco explorado.....	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Produtividades setoriais relativas	28
Tabela 2	– Quadro comparativo da Construção Civil: Brasil - EUA - UE ...	31
Tabela 3	– Etapas da Revisão Sistemática de Literatura	38
Tabela 4	– Definições e conceituações da prototipagem	160
Tabela 5	– Papéis dos diferentes tipos de representação.....	170

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
BDTD	Biblioteca Digital de Teses e Dissertações
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CIEP	Fábrica de Escolas do Rio de Janeiro
CLMA	<i>Construction Labor Market Analyzer</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CTRS	Centro de Tecnologia da Rede Sarah
DBIA	<i>Design-Build Institute of America</i>
EUA	Estados Unidos da América
FAEC	Fábrica de Equipamentos Comunitários de Salvador
FMI	<i>Fails Management Institute</i>
HCI	<i>Human-Computer Interaction</i>
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
PIB	Produto Interno Bruto
PUC	Pontifícia Universidade Católica
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SOAT	<i>The School of Architecture at Taliesin</i>
TI	Tecnologia da Informação
TU DELFT	<i>Technische Universiteit Delft</i>
UBC	<i>University of British Columbia</i>
UE	União Europeia
UFMS	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	26
1	A PROTOTIPAGEM: UMA ABORDAGEM PROJETUAL	42
1.1	Chartier e Badev (2013)	45
1.2	Ulrich e Eppinger (1995)	47
1.3	Houde e Hill (1997)	53
1.4	Lim, Stolerman e Tenenberg (2008)	63
1.5	Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler (2018)	67
1.6	Prototipagem rápida	76
2	REPRESENTAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL	80
2.1	Representações abstratas e focadas – gráficas e simbólicas	84
2.2	Representações físicas e focadas – maquetes e ensaios empíricos	92
2.3	Representações abstratas e abrangentes – a prototipagem virtual	106
3	PROTÓTIPOS FÍSICOS DE ALTA FIDELIDADE NA CONSTRUÇÃO	112
3.1	Representações físicas e abrangentes – Protótipos de alta fidelidade	112
3.2	Protótipos completos	116
3.3	Protótipos não-completos	137
	CONCLUSÕES	159
	REFERÊNCIAS	175

INTRODUÇÃO

O que a indústria atingiu desde que a mecanização foi introduzida é interessante e facilmente lembrada. Tudo que ela tem empreendido para atingir a distribuição em larga escala – a única razão de sua existência – sempre levou a custos menores e à melhora na qualidade. Quando, excepcionalmente, os preços não baixaram, a apresentação invariavelmente melhorou em proporção. Isso pode ser facilmente verificado em termos de carros, bicicletas, máquinas de costura, geladeiras, rádios, roupas etc. Apenas a habitação não contribuiu para o milagre industrial.

Jean Prouvé (apud: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 17)

No presente trabalho desenvolveu-se uma pesquisa acerca do uso, na Construção Civil, de “protótipos físicos de alta fidelidade”, uma abordagem de projeto mais comum a outras indústrias. Enquanto enquadramento teórico partiu-se das discussões sobre a prototipagem e a metodologia projetual advindas de áreas de conhecimento externas à Construção, tais como o Desenho Industrial, as Engenharias Mecânica e Eletrônica e as Ciências da Computação.

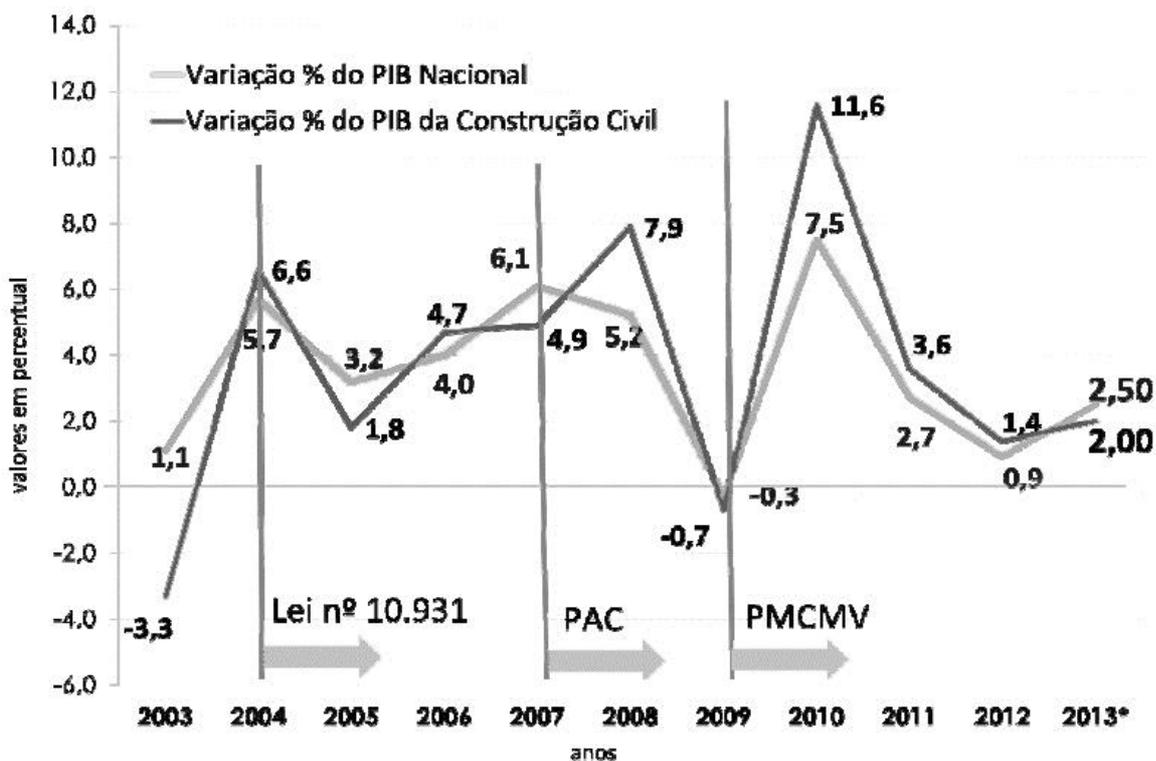
Essa decisão de se apoiar na fundamentação teórica de disciplinas de outras indústrias que não da Construção foi um ato deliberado e objetivo norteador da pesquisa desde seus primórdios. Inclusive foi com esse interesse em mente que se buscou desenvolver o presente trabalho em uma instituição de ensino de Desenho Industrial ao invés de uma de Arquitetura ou Engenharia Civil. Isso tudo se deve à percepção pré-existente do autor de que há uma grave disparidade entre o nível de eficiência e organização da Construção Civil comparado a outros setores, tidos como mais industrializados. Esse pressuposto foi inquirido e confirmado, como será explanado na subseção a seguir.

Entende-se que a pesquisa sobre os modos de trabalhar dessas áreas, por serem mais industrializadas, podem contribuir para a geração de novos conhecimentos e entendimentos sobre os problemas e as questões da Construção.

Com isso em mente se iniciou uma pesquisa de duas frentes: a análise de casos excepcionais da Construção Civil que fogem à regra da não-industrialização e o estudo da produção acadêmica acerca da metodologia projetual de áreas fora da Construção. O processo de definição do objeto de estudo se deu através de uma relação iterativa e interativa entre essas duas vertentes de trabalho e convergiu para o recorte sobre uma ferramenta de projeto específica, usada por esses casos excepcionais e em diversas indústrias, mas inusual na *Construção Civil* em geral: o protótipo físico de alta fidelidade.

Contextualização

Gráfico 1 – Comparação entre a variação dos PIBs Nacional e da Construção Civil



Fonte: CBIC, 2013, p. 6

Até o início da crise econômica de 2015, a indústria da Construção Civil passou por uma década de contínua expansão no Brasil e contribuiu significativamente para o crescimento do país. Impulsionado por iniciativas governamentais como o “Programa de Aceleração do Crescimento” e o “Minha Casa Minha Vida”, além de um quadro econômico geral favorável, entre 2004 e 2014 o crescimento do PIB da

Construção Civil superou o do PIB Nacional em 6 desses anos e apresentou índices positivos em todos exceto 2009, ano de recessão após a crise imobiliária internacional (Gráfico 1).

Apesar do papel relevante na economia nacional durante nosso mais recente período de bonança, o setor não deixou de continuar apresentando seus típicos baixos índices de produtividade, de racionalização e de qualidade. De acordo com o Estudo de Produtividade na Construção Civil de 2014, da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC):

No Período de 2007 a 2012, a Produtividade Total dos Fatores (PTF) das empresas de construção civil apresentou **declínio médio de 0,4% ao ano**. Essa queda da PTF foi observada em todos os anos do período analisado, à exceção de 2009. A queda da PTF indica uma perda de eficiência do setor, ou seja, ao analisar as empresas em seu conjunto, conclui-se que, **apesar do forte crescimento do nível de atividade nos anos recentes, o setor perdeu produtividade** (Grifo nosso).

Na Tabela 1, retirada da publicação Produtividade no Brasil da ABDI e IPEA (NEGRI, 2014), é feita uma comparação entre a evolução da produtividade de diversos setores econômicos brasileiros entre os anos de 1995 e 2012. Pode-se reparar que a Construção Civil perdeu produtividade relativa (ao total somado de todos as áreas) frente a setores como a Extração Mineral, a Agropecuária e outros nesse período.

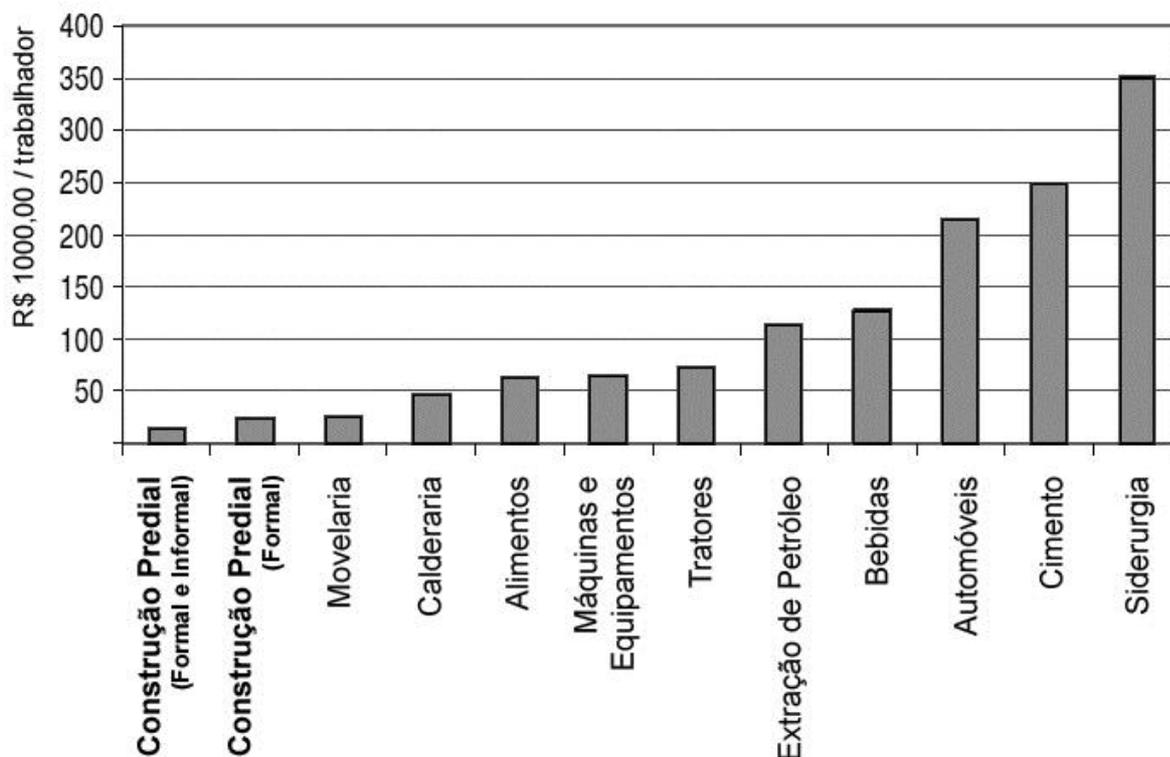
Tabela 1 – Produtividades setoriais relativas

	1995	1999	2004	2008	2012
Agropecuária – total	0,18	0,21	0,26	0,31	0,35
Extrativa mineral	9,64	11,92	12,94	13,64	13,90
Transformação	1,30	1,30	1,29	1,14	1,10
Construção civil	0,99	0,89	0,83	0,75	0,69
Prod. distr. eletricidade, gás, água	5,77	6,58	6,93	6,79	10,35
Comércio	0,83	0,79	0,71	0,75	0,77
Transporte, armazenagem e correio	1,49	1,43	1,29	1,21	1,12
Serviços de informação	4,81	5,50	1,64	1,47	1,58
Intermediários financeiros, seguros, prev comp, serv relac.	4,64	5,22	4,85	6,35	6,65
Outros serviços	0,66	0,61	0,59	0,58	0,57
Ativ imobiliárias e aluguéis	9,44	11,63	14,17	12,28	12,27
Adm, saúde e educação públicas	1,84	1,85	1,77	1,56	1,39
Total	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Fonte: NEGRI, 2014, p. 136.

Já no Estudo Panorama Setorial de Construção Civil (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2009, p.23), da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) é feita uma comparação semelhante, exibida a seguir (Gráfico 2), mas somente para o ano de 2005 e usando como critério de produtividade a relação entre o valor agregado produzido por setor dividido pelo número de trabalhadores necessários para gerá-lo. Também, nela há uma discriminação de indústrias normalmente agrupadas em setores globais, como na tabela anterior. Por exemplo, da Construção Civil em geral é destacado o segmento de Construção Predial e das Indústrias de Transformação são destacadas as de Siderurgia, Automóveis, Alimentos etc. Observa-se que, dentre as indústrias selecionadas, a Construção Predial fica muito aquém das outras, mesmo daquelas também responsáveis por fabricar produtos de alta complexidade, tais como as de Máquinas e Equipamentos, Tratores e Automóveis. A situação ainda é agravada quando se leva em consideração o trabalho informal, muito comum no segmento.

Gráfico 2 – Comparação entre produtividades de indústrias brasileiras



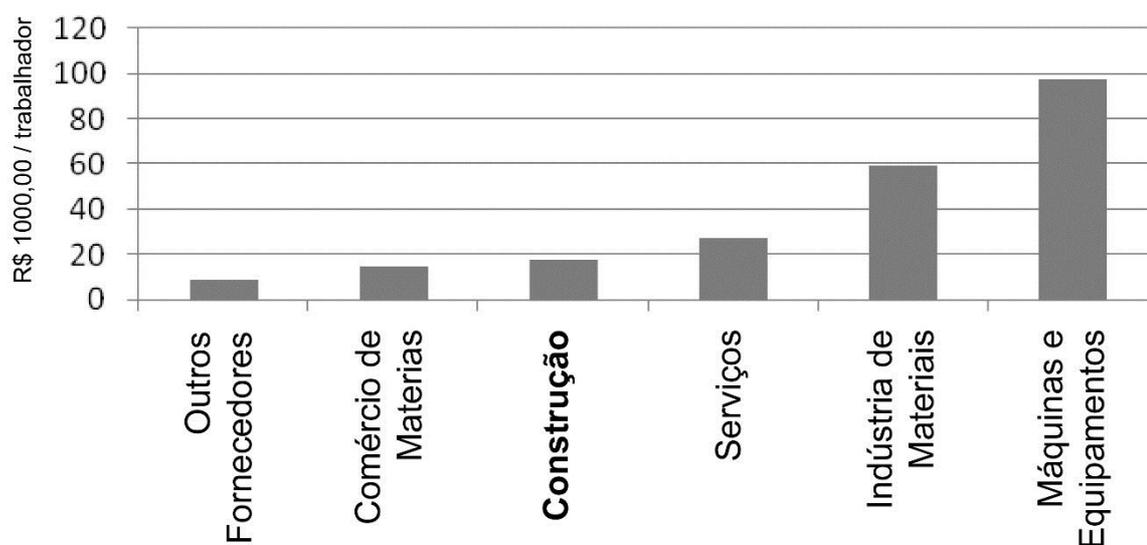
Fonte: adaptado de CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2009, p. 23.

Segundo esse mesmo estudo, diversos fatores são determinantes nesse quadro do segmento:

- a) Baixa qualificação dos trabalhadores;
- b) Pouco interesse das pequenas e médias empresas em melhorar o nível de qualificação dos empregados;
- c) Baixo investimento das empresas em pesquisa e desenvolvimento;
- d) A ausência de investimentos e conhecimento das empresas em técnicas de pré-fabricação, modularização, gerenciamento e implantação de sistemas e ferramentas de TI;
- e) Pouca utilização de sistemas de planejamento do trabalho; e
- f) Altas taxas de desperdício de materiais e retrabalho.

Poderíamos ainda acrescentar a essa lista as estruturas legais e tributárias dos processos de planejamento e execução e, principalmente, a própria natureza do trabalho da Construção que, normalmente, é *in loco*¹. O setor é marcado pela grande quantidade de trabalho feito diretamente no local de implantação de uma construção, ao passo que outras indústrias desenvolvem seus produtos em ambientes fabris especificamente organizados para a produção em série.

Gráfico 3 – Comparação entre produtividades da cadeia da Construção Civil



Fonte: adaptado de CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2009, p. 13.

¹ do latim: “no lugar”

Mesmo dentro da própria indústria existem disparidades, como demonstrado no Gráfico 3. A Construção em si é significativamente menos produtiva que outros segmentos de sua própria cadeia produtiva, como o de Materiais de Construção e o de Máquinas e Equipamentos para a Construção. Vale ressaltar que esses não têm o fator da produção *in loco*, tipicamente desenvolvendo seus produtos em fábricas, oficinas e outros tipos de ambientes industriais.

Ademais, se compararmos os níveis de eficiência e produtividade da Construção Civil brasileira com a de países desenvolvidos, vemos que há uma significativa discrepância. No mesmo estudo da ABDI, foi feita uma comparação entre alguns indicadores do segmento no Brasil, nos Estados Unidos e na União Europeia:

Tabela 2 – Quadro comparativo da Construção Civil: Brasil - EUA - UE

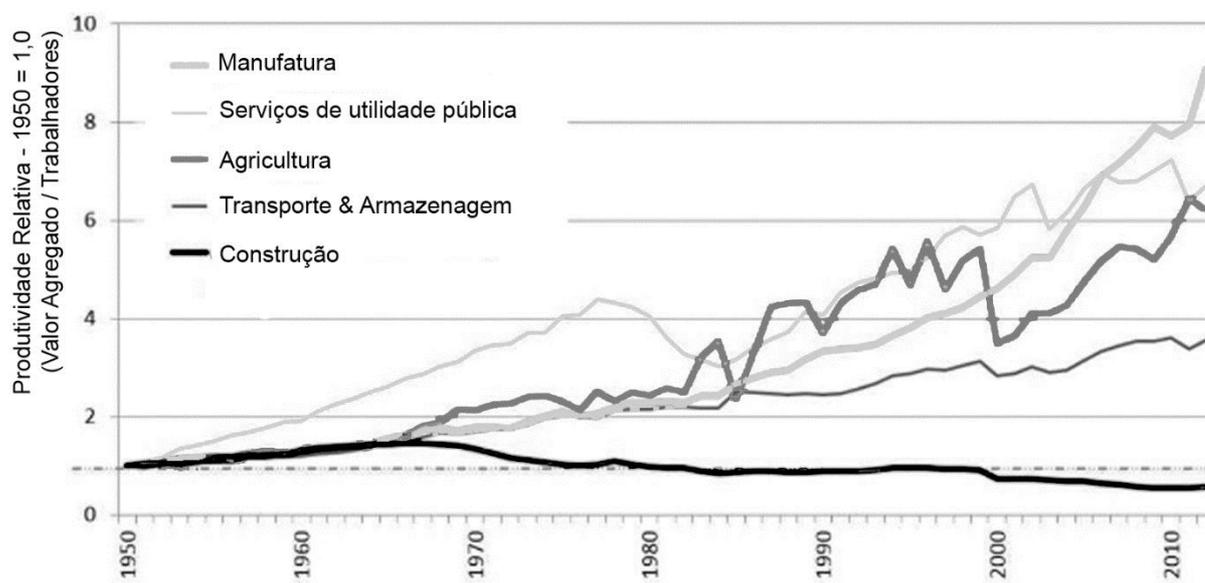
Indicadores	Brasil	EUA	UE
% PIB	5,2 % (1)	8,47 % (11)	10,2 % (21)
Faturamento	US\$ 40,98 bilhões (2)	US\$ 475,6 bilhões (12)	US\$ 710 bilhões (22)
Número de empresas	105.459 (1)	818.000 (13)	807.100 (23)
Faturamento médio	US\$ 388.590*	US\$ 581.420*	US\$ 879.690*
Pessoal empregado	1.550.000 (1)	7.689.000 (14)	4.519.000 ***
Pessoal ocupado	5.170.000 (3)	9.589.000 **	4.519.000***
Produtividade média	US\$ 6177,76 / trabalhador (4)	US\$ 41528,00 /trab. (15)	US\$ 31247,44 /trab. (24)
Rentabilidade	24,35 % (5)	67,5 % (16)	não foram obtidos dados
Número de eng ^o e gerentes	125.420 (6)	623.000 (17)	550.530 (25)
Engenheiros/ MO total	2,4%	6,5%	12,2%
Engenheiros/ MO empregada	8%	8%	12,2%
Tempo de formação de pessoal nível superior	5 anos (7)	5 anos (18)	5-7 anos (26)
Tempo de formação de pessoal nível médio	2 - 3 anos (8)	3 anos (18)	2 - 3 anos (26)
Nº de normas técnicas para Construção Civil	938 (9)	ND	1733 (27)
Prazo médio de obras de edificação	30 meses (10)	10 meses (19)	14,3 meses (28)
Prazo médio de licenciamento	66 dias (10)	30 dias (20)	44 dias (29)

Destaca-se que no Brasil o setor:

- a) Produz (R\$/trabalhador) 6,7 vezes menos que nos EUA e 5,1 vezes menos que na UE;
- b) Demora, em média, 3 vezes mais tempo para concluir obras de edificações que nos EUA e 43% a mais que na UE; e,
- c) Leva mais que o dobro do tempo para licenciar uma obra que nos EUA e 50% a mais que na UE.

Apesar desse descompasso entre o nível de eficiência e organização da Construção no Brasil em relação a países mais industrializados, essa desigualdade frente às outras indústrias também existe nos outros países. Por exemplo, de acordo com dados do *Bureau of Economic Analysis*, órgão federal dos Estados Unidos, a Construção Civil naquele país vem perdendo produtividade desde meados dos anos 1960 enquanto as de diversas outras indústrias - em especial as de Manufatura - vêm crescendo a um ritmo forte desde então:

Gráfico 4 – Produtividade das indústrias nos EUA de 1950-2012

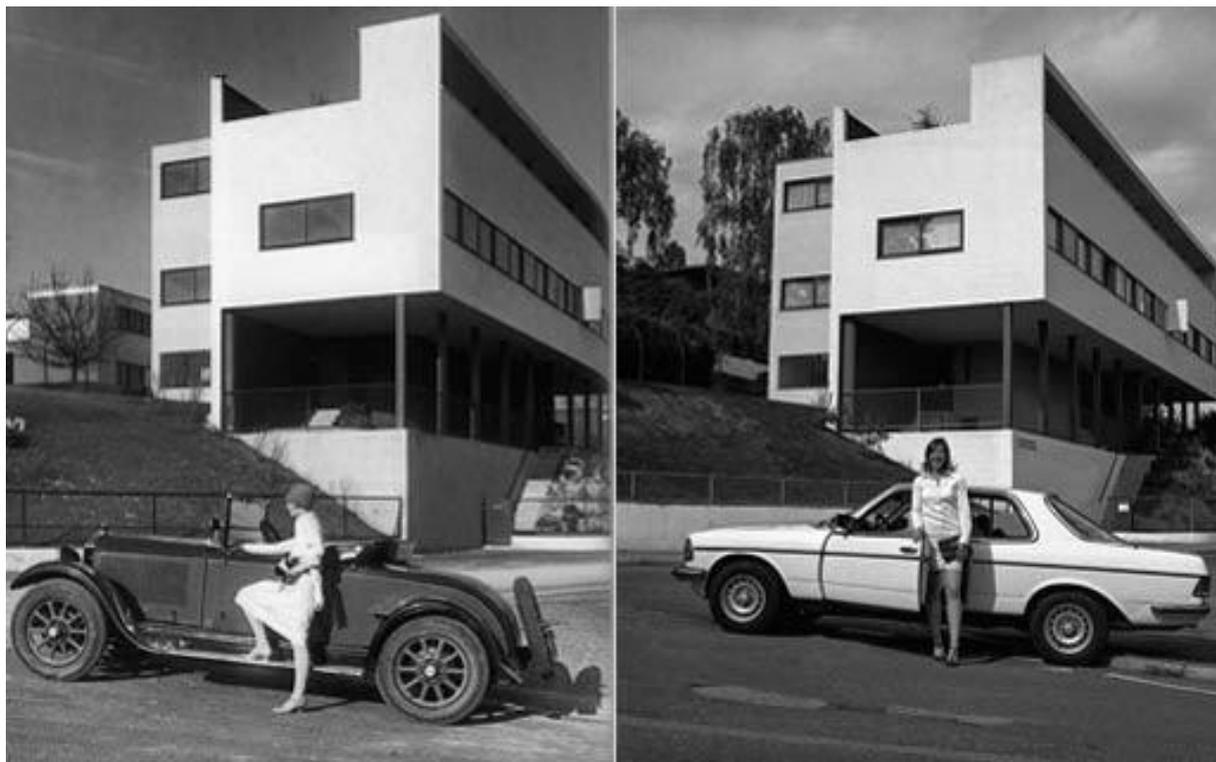


Fonte: adaptado para o português de CLMA, 2016, p. 7.

A discrepância entre a eficiência do setor em relação a outros mais industrializados aparenta ser uma condição comum no mundo todo. De fato, a defesa do uso de métodos industriais na Construção é tópico corrente até hoje nos meios acadêmicos e profissionais dos EUA, Europa e Ásia (KNAACK, CHUNG-KLATTE, HASSELBACH, 2012, p. 50-60).

Enquanto indústrias como a automobilística, de máquinas e de bens de consumo em geral evoluíram drasticamente ao longo do século XX, ainda é comum na Construção retomarmos temas discutidos desde o século XIX e que nunca foram plenamente incorporados, tais como a pré-fabricação, a construção industrializada e a modularização. Esse atraso é exemplificado visualmente pela Figura 1, a seguir.

Figura 1 – Dois automóveis Mercedes-Benz em frente às Casas Weissenhof - 1927 e 1977.



Fontes: Disponível em: <media.daimler.com> e <flickr.com/photobsen>. Acesso em Jun 2019.

As Casas Weissenhof, projetadas por Le Corbusier e Pierre Jeanneret e construídas em 1927, são muito semelhantes às construções de hoje, tanto esteticamente quanto em relação às técnicas construtivas empregadas em sua execução: estrutura de concreto armado moldado *in loco*, vedações de alvenaria cerâmica assentada por pedreiros, esquadrias de aço executadas por serralheiros, etc. Por sua vez, os automóveis estacionados à frente dos edifícios evidenciam a significativa mudança que se deu no desenho e nos modos de fabricação praticados pela indústria automobilística durante os cinquenta anos que decorreram entre as duas fotografias. Soma-se a isso ainda o fato de já terem se passado quase quarenta anos desde que a segunda fotografia foi tirada, com mais outros inúmeros avanços tecnológicos tendo sido desenvolvidos nos automóveis. Ainda hoje, porém, a maioria das construções brasileiras não diferem substancialmente dessas de 1927.

Justificativa

Apesar de sua importância para a economia de vários países, a Construção Civil ainda é caracterizada como conservadora e refratária a mudanças. Devido aos riscos e incertezas inerentes às inovações tecnológicas essas são pouco difundidas para a maior parte do setor, sendo praticadas apenas por empresas e profissionais excepcionais. Somente depois de muito consolidada é que uma tecnologia passa a ser adotada por um número razoável de outras empresas (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2009, p. 169).

Um dos empecilhos ao ganho de produtividade e qualidade no setor é justamente sua limitada capacidade de inovação. Apesar de ser razoável que uma indústria tão antiga não consiga manter o ritmo de inovações de outras relativamente recentes - como a automobilística ou a de produtos de informática - o que se percebe é que nela são repetidas as mesmas soluções por décadas, ou até mesmo séculos. Quando são aprimoradas isso normalmente se dá apenas de forma incremental e somente com técnicas já amplamente consolidadas. Acredita-se que parte desse conservadorismo se deve às incertezas sobre o uso de novas soluções, geradas pela falta de garantias e o grande risco econômico e funcional que existe ao aplicar novas soluções. O presente trabalho pretende abordar essa questão ao trazer para a Construção Civil conceitos e abordagens das indústrias que atualmente se apresentam como mais inovadoras.

Apesar do cenário descrito, há exemplos de obras de exceção e tipologias específicas que fogem à regra e ao menos se aproximam das indústrias seriadas em termos de eficiência e inovação. Normalmente são as denominadas, justamente, de “construções industrializadas”. Dentre elas há as obras de grande porte que empregam sistemas modularizados de componentes pré-fabricados e construções menores que se repetem muitas vezes e que podem ser completamente fabricadas *off-site*² para depois serem levadas ao local de implantação. Normalmente são de tipologias específicas que se prestam mais facilmente a esse tipo de organização produtiva, por exemplo: fábricas e outros edifícios industriais, habitações em massa (de prédios altos ou de casas-padrão), torres comerciais e de hotelaria, equipamentos esportivos grandes como estádios, edifícios hospitalares, edifícios educacionais,

² Do inglês: “fora do local”. Refere-se a elementos fabricados em ambientes industriais especialmente organizados para tal fim e anteriormente à implantação na obra. O contrário da construção *in loco*, ou feita no local.

obras de infraestrutura e de urbanização. Ademais, há instituições e profissionais reconhecidos por se dedicarem e se especializarem nessas modalidades, tornando-se notórias referências na construção industrializada.

O presente estudo se debruçou sobre uma abordagem projetual utilizada por diversas dessas exceções: **a prototipagem física**. Muito utilizado em indústrias seriadas, mas pouco presente na Construção Civil, esse mecanismo apresenta oportuno objeto de estudo, pois evidencia as diferenças entre as práticas dessas indústrias e como elas podem levar à maior ou menor eficiência e inovação. O presente trabalho se debruça sobre essa técnica projetual excepcional através da ótica de outros setores tidos como mais industrializados e que a utilizam com maior frequência.

Apesar de ser evidente que diversos fatores convergem para o quadro atual da Construção, e que certamente dentre eles incluem-se os processos de execução, neste estudo focou-se sobre os processos projetuais, e não os executivos. Como o foco da pesquisa é sobre o protótipo enquanto ferramenta de projeto, os processos de execução, fabricação, montagem e construção são abordados apenas no sentido em que influenciam o planejamento dos produtos e serviços.

Objetivos

Originalmente se buscou analisar o papel da prototipagem dentro dos processos projetuais de um caso de exceção na Construção: o arquiteto brasileiro João Filgueiras Lima. Lelé, como também era chamado, é tido como um dos pioneiros da construção industrializada no Brasil e era amplamente reconhecido por ter empregado abordagens de projeto e de execução incomuns para a Construção Civil (BASTOS, ZEIN, 2011; GUIMARÃES, 2010). Envolveu equipes multidisciplinares de técnicos e operários especialistas desde o início dos projetos; buscava subdividir seus projetos em componentes que eram pré-fabricados em oficinas, minimizando a quantidade de trabalho executado na obra em si; e, principalmente, desenvolvia seus projetos nas próprias fábricas em que seriam depois produzidos, criando, testando e aprimorando soluções através de protótipos (RISSELADA, LATORRACA, 2010; LUKIANTCHUKI, 2010).

Contudo, durante a etapa de revisão bibliográfica para a fundamentação teórica do estudo de caso, se percebeu que não existem muitas publicações que se dedicam

à prototipagem em projetos da Construção Civil e as que o fazem focam apenas em técnicas específicas. Ficou evidente que não há, atualmente, bases conceituais abrangentes e firmemente estabelecidas sobre o uso de protótipos enquanto abordagem projetual no meio.

Inicialmente foram feitas buscas em diversas bases catalográficas por teses, dissertações, artigos e livros de áreas de conhecimento ligados à Construção Civil e que empregam as palavras “protótipo” e/ou “prototipagem”, e suas variantes em inglês. Apesar de haver centenas de trabalhos que resultaram dessa busca, de um modo geral não estabelecem definições e conceitos necessários ao interesse central desta pesquisa. Ao invés, abordam preponderantemente a “prototipagem rápida” – método de produção de protótipos e maquetes através de máquinas com braços robóticos - ou a “prototipagem virtual” – o desenvolvimento de modelos 3D digitais complexos. Outros tantos trabalhos apenas empregam os termos buscados como figuras de linguagem. Tanto a prototipagem rápida quanto a virtual são tratadas e classificadas na presente dissertação. Contudo, são apenas manifestações particulares da prototipagem e neste trabalho o foco é, ao invés, entender de forma abrangente o papel dela em processos de planejamento e projeto na Construção.

Por outro lado, foram encontrados estudos e publicações que tratam da conceituação ampla da prototipagem em campos externos à Construção; notadamente naqueles associados às indústrias seriadas que tipicamente empregam essa abordagem. Com isso, antes de prosseguir ao estudo de caso sobre o Lelé, foi necessário um longo processo de levantamento e análise dessa bibliografia e, principalmente, a adaptação dela ao campo da Construção Civil. Com o decorrer desse trabalho, ficou evidente que, dentro dos limites cronológicos e de escopo de uma dissertação de mestrado, não seria possível realizar essa revisão e adaptação bibliográfica e, também, o estudo de caso mais aprofundado sobre Lelé.

Assim, o foco da dissertação foi reenquadrado para a construção de pontes teóricas e conceituais entre as áreas de conhecimento das indústrias seriadas e as da Construção. A contribuição pretendida então se transformou, passando a visar a proposição de bases teóricas e definições para a prototipagem na Construção Civil, cujas ausências foram verificadas. Dessa forma, o objetivo central desta dissertação passou a focar sobre as seguintes questões:

O que são “protótipos”? Como a “prototipagem” é empregada em processos projetuais, em geral, e na Construção Civil em específico? Qual a relevância dela para esses processos e de que forma difere de outras técnicas projetuais da Construção?

Diferentemente da Construção Civil, nas indústrias de produtos seriados a prototipagem é uma técnica de projeto muito utilizada. Nelas, normalmente só se envia projetos para a produção em massa após terem sido validados através desse tipo de processo. Protótipos são empregados nessas disciplinas justamente com o fim de avaliar propostas antes de se comprometer a elas, possibilitando o desenvolvimento de soluções arriscadas, inovadoras e, por vezes, disruptivas. Contudo, é muito raro ver seu uso na Construção e quando ocorre nem sempre são empregados os termos “protótipo” ou “prototipagem” para descrevê-los. Outras formas de representação, como o desenho técnico e as maquetes, são quase ubíquas no meio e, assim, praticamente não existe uma conceituação formal sobre a prototipagem.

Buscou-se, então, trazer as formulações existentes nos setores onde a prototipagem é proeminente e usá-las para enquadrar essa técnica na Construção. Para isso, efetuou-se uma Revisão Sistemática da Literatura existente sobre a prototipagem em diversos campos científicos. Essa revisão contemplou uma busca ampla por referências bibliográficas, a seleção criteriosa de conteúdos relevantes, e a compilação e análise de suas proposições. Em seguida, procedeu-se para o exame das formas de representação típicas da Construção Civil, e, também, dos excepcionais casos de prototipagem, sob o enquadramento teórico da literatura levantada. Por fim, foi elaborada uma síntese das formulações teóricas compiladas e propostas, relacionando a prototipagem às teorias gerais da metodologia projetual, destacando a relevância dessa abordagem e apontando possíveis pesquisas futuras.

Metodologia de Pesquisa

De acordo com Phillips e Pugh (2005, p. 56-60) há quatro elementos centrais que definem a forma de teses e dissertações acadêmicas. A presente pesquisa foi estruturada em torno desses elementos, que correspondem aos capítulos 1, 2, 3 e às conclusões finais desta dissertação, que assim manifestam as quatro etapas de desenvolvimento:

- a) Fundamentação Teórica;
- b) Teoria de Foco;
- c) Novos Dados; e,
- d) Contribuições.

O primeiro capítulo, “A Prototipagem”, corresponde à etapa de Fundamentação Teórica³ proposta por Philips e Pugh e consiste na compilação, organização e análise da literatura fundamental ao campo de conhecimento do tema da pesquisa. Como foi mencionado no anteriormente esse tema foi aprimorado ao longo do estudo. Originalmente a revisão focou sobre a bibliografia acerca do arquiteto João Filgueiras Lima, seus métodos projetuais, e a prototipagem na Construção Civil. Contudo, no decorrer da pesquisa, com a constatação da ausência de uma teoria fundamentadora da prototipagem na Construção e o redirecionamento do foco da pesquisa, essa Revisão de Literatura passou a debruçar-se principalmente sobre a produção referente aos protótipos em outros campos.

Tabela 3 – Etapas da Revisão Sistemática de Literatura

Etapas	Sub-etapas e Descrição
<i>1) Definição da Pergunta de Pesquisa</i>	Formulação de uma pergunta síntese, que representa e define o objeto de estudo e o escopo da pesquisa.
<i>2) Busca de Dados</i>	Identificar as bases de dados a serem consultadas; Definir termos, palavras-chave e estratégias de busca; Conduzir buscas nas bases de dados escolhidas, aplicando as estratégias definidas.
<i>3) Revisão e Seleção de Conteúdos</i>	Estabelecer critérios iniciais para a seleção dos trabalhos obtidos a partir dos resultados da busca; Definir filtros para a exclusão de resultados da busca, aplicando-os na seleção dos trabalhos e justificando possíveis exclusões; Identificar trabalhos mais relevantes no tema estudado e as principais referências utilizadas.
<i>4) Análise dos Dados Selecionados</i>	Realizar leituras e análises dos trabalhos selecionados, identificando principais proposições;
<i>5) Apresentação de Resultados</i>	Apresentar uma conclusão, com resumo analítico dos trabalhos, sintetizando as leituras realizadas a partir dos dados reunidos e compilados, e delineando os principais trabalhos; Indicar pontos relevantes para a realização de pesquisas semelhantes, assim como diretrizes para pesquisas mais aprofundadas sobre o tema em questão.

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de Sampaio e Mancini (2007, p. 85-87)

³ *Background Theory* em inglês

Partindo do modelo de Revisão Sistemática de Literatura proposto por Sampaio e Mancini (2007) para a Prática Baseada em Evidência (PBE), estruturou-se a busca por referências em 5 etapas: Definição da Pergunta de Pesquisa, Busca de Dados, Revisão e Seleção de Conteúdos, Análise dos Dados Seleccionados e Apresentação de Resultados, conforme a Tabela 3. Seguindo esta estrutura metodológica, definiu-se, ao longo do processo de reformulação do objeto de pesquisa, a seguinte pergunta síntese a ser abordada na busca de referências: **O que são “protótipos” e como são usados em processos projetuais?**

Com esse direcionamento, foram realizadas buscas por artigos, livros, teses e dissertações, em português e inglês, nas bases digitais *on-line* da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD) do IBICT, da Biblioteca de Teses e Dissertações da CAPES, da plataforma de Periódicos da CAPES, da *Web of Science* e do *Google Scholar*.

Os termos de busca escolhidos foram as palavras em português “protótipo” e “prototipagem” e seus equivalentes em inglês – “*prototype*” e “*prototyping*”. Para contemplá-las todas de uma só vez, utilizou-se como termo síntese a expressão “protot*”, pois o operador * permite qualquer variação de texto daquele ponto em diante na expressão. Assim esse único termo síntese contempla as palavras com sufixo “ipo” “ipagem”, “ype”, “yping” e qualquer outra combinação possível. Esse termo síntese foi então empregado em buscas nas bases definidas, em campos de pesquisa referentes aos títulos, resumos e palavras-chave das publicações.

O número de resultados foi da ordem de milhares de publicações, mas majoritariamente de conteúdos não relevantes, portanto procedeu-se com a Revisão e Seleção de Conteúdos levantados. Foram definidos e aplicados os seguintes critérios de seleção: a exclusão por área da publicação; exclusão de trabalhos por foco do estudo; seleção por leitura dos títulos, resumos e sumários; e a Inclusão de referências citadas.

Os dados preliminares acusavam trabalhos de diversas áreas, inclusive muitas não relevantes à presente pesquisa, tais como a Psicologia e áreas médicas em geral. Decidiu-se excluir todos os trabalhos que não fossem classificados, pelas suas respectivas bases de origem, como sendo da Construção – Arquitetura, Engenharia Civil, Engenharias de Instalações Prediais etc. - ou do desenvolvimento de produtos em geral – Desenho Industrial, *Design Engineering*, Engenharia Mecânica, Ciências da Computação etc. A seguir, foram descartados os estudos com foco na

prototipagem rápida ou virtual, que, como foi afirmado anteriormente, contempla quase a totalidade daqueles da Construção.

Chegando a um número de trabalhos já significativamente menor do que originalmente apresentado, foi possível realizar, com relativa rapidez, uma análise preliminar de todas as publicações, uma a uma. Através deste processo, determinou-se quais pesquisas poderiam ser excluídas, por não serem relevantes à pesquisa. Iniciou-se pela leitura dos títulos e depois dos resumos e/ou sumários para identificar e manter os trabalhos que abordam ao menos um dos dois aspectos da pergunta de pesquisa: “o que são protótipos” ou “como são usados”.

Seguiu-se então por uma leitura preliminar dos trabalhos selecionados, observando as principais definições e conceituações que propõem. Nesse processo, foram incluídas algumas novas publicações, ao se observar referências citadas repetidamente por diversos autores e outras que apresentam a raiz de conceitos relevantes apontados nas literaturas analisadas. Com desse processo, chegou-se a um conjunto de trabalhos que se entende serem os mais relevantes para a presente pesquisa e que consiste essencialmente de artigos e livros relativamente recentes - dos anos 1990 até os dias de hoje – advindos das áreas da Engenharia Mecânica, *Design Engineering* e Ciências da Computação.

Partiu-se, então, para uma leitura mais aprofundada da bibliografia escolhida e a Análise dos Dados Selecionados, identificando as principais conceituações e definições propostas pelos estudos. Por fim, foi elaborada uma síntese analítica das literaturas compiladas, que é apresentada no primeiro capítulo desta dissertação.

Já o segundo capítulo equivale à etapa da Teoria de Foco⁴ de Philips e Pugh (2005, p. 58) e nele a pesquisa se debruça sobre a “prototipagem” na Construção Civil, segundo as definições abordadas na etapa anterior. O objetivo é discutir, de um modo abrangente, como o enquadramento teórico levantado pode ser aplicado sobre os processos projetuais e as representações típicas da Construção. Dessa forma é iniciada a discussão central da dissertação, abrindo frente para a contribuição de novos dados no capítulo seguinte.

Com o enquadramento teórico definido na primeira etapa e o modo como ele pode ser aplicado sobre a Construção Civil estabelecido na segunda, na terceira etapa da pesquisa é objetivado o acréscimo de Novos Dados à discussão. Esse aporte se

⁴ *Focal Theory*

dá pelo levantamento de casos que evidenciam a prototipagem física de alta fidelidade na Construção. Essa abordagem, anômala ao setor, mas comum às outras áreas de onde foram levantadas as bases teóricas deste estudo, fornece uma série de vantagens sobre os outros métodos de representação tradicionais, apontados no segundo capítulo. A busca por um melhor entendimento da prototipagem, de seu papel em projetos, em geral e na Construção, é o foco principal desta dissertação.

Por fim, a fase de Contribuições (2005, p. 59) corresponde à seção de Conclusões da dissertação e consiste na síntese gráfica e textual das informações e conceitos levantados e propostos ao longo desta dissertação. Nessa análise final, são discutidas a relevância da prototipagem e do estudo dela, a contribuição pretendida para o meio acadêmico e profissional em que o trabalho se situa, as limitações da pesquisa e indicações de pontos relevantes e diretrizes para estudos futuros que venham a abordar este tema ou temas semelhantes.

1 A PROTOTIPAGEM: UMA ABORDAGEM PROJETUAL

Como explanado anteriormente, neste capítulo é enunciada uma série de conceituações acerca da prototipagem enquanto ferramenta projetual, oriundas de trabalhos acadêmicos, de áreas externas à Construção Civil, compilados em uma Revisão Sistemática de Literatura. A seguir são apresentadas sínteses dos principais trabalhos teóricos levantados nesse processo e dos conceitos que propõem.

Figura 2 – *Designers* da Ford criando um protótipo de argila do *Mustang I* (1962)



Fonte: FORD MEDIA. Ford Mustang I Concept Promotional Film. 1962.

Os protótipos, enquanto artefatos, e a prototipagem, enquanto processo, configuram ferramentas e abordagens de projeto essenciais ao desenvolvimento de novos produtos⁵ e soluções em diversas indústrias. Mas, apesar de centrais a diversos

⁵ O termo “*produto*” é muito utilizado no Desenho Industrial e nas Engenharias de setores altamente industrializados para descrever o objeto final que é desenvolvido em um projeto. Na Arquitetura e na Engenharia Civil esse termo é pouco empregado e, ao invés, usam-se palavras que descrevem de modo mais específico o trabalho em questão, tais como “edifício”, “casa”, “loja”, “ponte”, “urbanização” ou “reurbanização”, “loteamento”, etc. Também, frequentemente o próprio termo “projeto” é usado para descrever o objeto final, semelhante ao que ocorre em inglês com o termo “*design*” em todas as áreas.

setores produtivos, são relativamente pouco estudadas formalmente, mesmo nesses próprios setores (LAUFF; KOTYS-SCHWARTZ; RENTSCHLER, 2018, p. 1). De acordo com Camburn et al (2013, p. 1), “a prototipagem talvez seja simultaneamente uma das áreas de projeto⁶ mais importantes e menos explorada formalmente” (tradução nossa).

Todavia, nas últimas duas décadas vem aumentando a produção de pesquisas sobre a prototipagem, principalmente nos campos da Ciência da Computação, mais especificamente da HCI (*Human-Computer Interaction* ou Interação Humano-Computador) e, em menor quantidade, da Engenharia Mecânica.

Na Construção Civil, que inclui a Arquitetura e Urbanismo, a Engenharia Civil e as Engenharias relacionadas às instalações prediais, há poucos estudos que usam o termo “protótipo” ou “prototipagem”. Quando esses termos são empregados, quase sempre o são em pesquisas que tratam da “prototipagem rápida”, que aborda o uso de tecnologias de fabricação específicas, tais como impressoras 3D e outras máquinas de Controle Numérico Computadorizado – CNC.

Percebe-se que ainda há no tema uma falta de consenso acerca das definições de termos e conceitos; e frequentemente aquilo que se conhece por um nome em uma indústria, tem outro em outra indústria. Por exemplo, em textos acadêmicos, e não acadêmicos da HCI, é comum ver o termo “prototipar” assumir um significado igual ou semelhante ao que seria chamado de “projetar” na Construção Civil. Para Lim, Stolerman e Tenenberg (2008, p. 1) há “ainda uma falta de conhecimento sobre a natureza fundamental dos protótipos devido a sua natureza complexa e dinâmica” (tradução nossa). Já para Yu, Pasinelli e Brem (2018, p. 122) “não há distinção clara entre perspectivas da prototipagem como um conceito, uma abordagem, um método ou uma tecnologia” (tradução nossa).

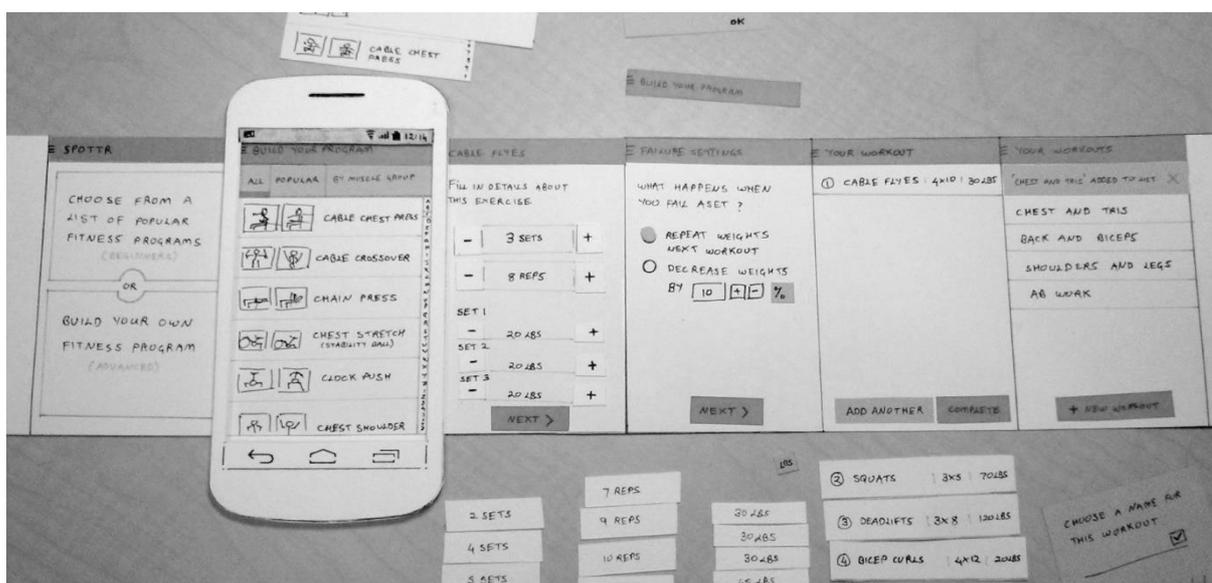
A palavra “protótipo” é usada em vastas situações e em diferentes disciplinas de trabalho e, como reflexo desse contexto variado, não apresenta uma só definição consistente. No campo da HCI, Naumann e Jenkins (1982) definem um “sistema protótipo” como aquele que “captura as características essenciais do sistema futuro”;

Neste trabalho, “produto” será usado para abarcar todos esses significados uma vez que são usadas referências bibliográficas de diversas disciplinas, e assim seus assuntos podem ser contemplados.

⁶ No texto em inglês usou-se o termo “*design*”. Nesta dissertação optou-se por usar, de um modo geral, as palavras “projetar” e “projeto” para representar, respectivamente, o processo de conceber um produto e a manifestação, física ou abstrata, desse processo.

já para Beudouin-Lafon e Mackay (2003, p. 1082) o protótipo é “uma representação concreta de parte ou de todo um sistema interativo”. Na Engenharia Mecânica, Camburn et al (2013) descrevem o protótipo como um meio de “verificar ou melhorar uma funcionalidade, desempenho e operação de um dispositivo ou sistema novo” (Tradução nossa); já Ulrich e Eppinger (2012, p. 291) defendem o conceito como “uma aproximação de um produto ao longo de uma ou mais dimensões de interesse” (tradução nossa).

Figura 3 – “Protótipo de papel” usado no projeto da interface digital de um aplicativo para *smartphone*



Fonte: NESSLER, Dan. A guide to paper prototyping & testing for web interfaces. Disponível em: <https://medium.com/digital-experience-design/a-guide-to-paper-prototyping-testing-for-web-interfaces-49e542ba765f>. Acesso em: Maio 2019

A maioria dos estudos sobre essa ferramenta focam em aplicações específicas de determinadas áreas, como por exemplo o uso de “protótipos de papel” em etapas preliminares do desenvolvimento de interfaces digitais (Figura 3). Poucos trabalhos buscam definir conceitos e classificações para a prototipagem de um modo global. Segundo Lim, Stolerman e Tenenberg (2008, p. 1), “Pesquisas atuais têm focado principalmente nos diferentes tipos de prototipagem sem nenhuma análise rigorosa do que protótipos são [...]”.

Apesar desse cenário, existem alguns autores que defendem uma estrutura teórica que dá sustento ao uso dessa ferramenta independente da área de aplicação, e propõem definições e categorizações gerais. A seguir são apresentados alguns dos trabalhos desses autores cujas propostas aparentam ser as mais relevantes para a Construção Civil e para a presente pesquisa.

1.1 Chartier e Badev (2013)

Em um capítulo do livro *Handbook of Advanced Ceramics* (2013, p.490), onde discutem a prototipagem rápida de componentes cerâmicos para a eletrônica, esses autores fazem uma breve proposição de definições e categorizações da prototipagem. Afirmam que “protótipos são criados para materializar a conceptualização de um projeto” (tradução nossa) e que são usados no processo projetual por engenheiros e projetistas⁷ para explorar alternativas, testar teorias, descobrir a reação de consumidores e confirmar desempenhos antes da produção final de um novo produto. Para os autores a implementação da prototipagem contempla desde a representação de partes ou componentes de um produto até o produto completo e discriminam cinco tipos principais de protótipos:

- a) **Protótipo Funcional** – modela e simula quase todas, senão todas, as características de um produto final. Normalmente é desenvolvido em escala real e é plenamente funcional, representando a completude do objeto projetado. Contudo, pode às vezes ser feito em escala reduzida por questões de economia, quando isso não afetar seu funcionamento. Trata-se do teste completo para a verificação final de erros de projeto, permitindo ajustes de última hora que ainda podem ser feitos antes dele ser enviado para a fabricação.

- b) **Protótipo de Prova-de-Conceito** – usado para testar ou verificar algum aspecto específico do projeto, porém sem simular com precisão todas as características finais; frequentemente não contempla a aparência visual final do produto ou escolhas de materiais e processos de fabricação pretendidos. Esse tipo de protótipo pode ser usado para comprovar a viabilidade ou eficácia técnica de uma solução e compará-la a outras, determinando qual deve continuar a ser desenvolvida e testada.

⁷ No texto original foi usado o termo *designer*. Em inglês essa palavra tem um significado mais amplo que no português brasileiro, e é frequentemente usada para se referir a profissionais projetivos de um modo geral. Comumente se acrescenta adjetivos ao termo para descrever profissões específicas como, por exemplo, *architectural designer* (arquiteto), *graphic designer*, *systems designer*, etc. Neste trabalho optou-se por usar o termo *projetista* para se referir genericamente a profissionais que desenvolvem projetos e usar o termo *designer* apenas para se referir a profissionais do Desenho Industrial.

- c) **Protótipo de Experiência-do-Usuário** – feito para a interação com pessoas, é usado principalmente para auxiliar em pesquisas focadas no usuário. Mesmo sem ser uma representação visual fiel de um produto final, esse tipo de protótipo apresenta seu tamanho, proporção, interface e funcionamento aproximados. Esse tipo de modelo facilita a compreensão sobre como as pessoas interagem com os vários elementos e ações de uma solução, simulando a experiência geral do usuário. Como é sujeito ao uso e manuseio, geralmente apresenta construção relativamente robusta.
- d) **Protótipo Visual** – captura a aparência pretendida do projeto e simula a forma, tamanho, cores e texturas de um produto, mas sem incorporar o funcionamento final dele. Esse tipo de modelo é adequado para estudos de mercado, reuniões executivas, avaliações e peças de divulgação e vendas.
- e) **Protótipo de Estuda-da-Forma** – permite aos projetistas explorarem tamanhos e formas básicas de um produto, mas sem simular o funcionamento real ou a aparência exata dele. Pode ajudar a determinar fatores ergonômicos do produto e melhorar o entendimento sobre o aspecto visual final dele. Frequentemente são fabricados - manualmente ou através de máquinas - a partir de materiais baratos, tais como isopor ou papel, e não representam aspectos finais como cor e textura. Devido à sua aparência bruta, esses modelos normalmente são usados apenas para processos decisórios internos à equipe de projeto; não sendo duráveis ou apresentáveis o suficiente para serem usados em avaliações com usuários e clientes.

Essa categorização, apesar de breve e de ser apenas um pequeno trecho de um trabalho com outro enfoque, ordena e sintetiza de uma forma clara uma série de termos muito utilizados no tema. As designações propostas por eles para os tipos de protótipos foram observadas em diversos textos, porém não foram definidas formalmente em outras fontes.

1.2 Ulrich e Eppinger (1995)

No célebre livro *Product Design and Development*⁸, Karl Ulrich e Steven Eppinger, da Engenharia Mecânica, dedicam um capítulo inteiro à prototipagem, suas classificações, usos e definições. Nele, advogam que apesar dos dicionários apontarem que a palavra “*prototype*” é somente um substantivo, na prática é usada também como verbo e adjetivo:

Industrial designers produce prototypes of their concepts. Engineers prototype⁹ a design. Software developers write prototype programs. (ULRICH, EPPINGER, 2012, p.291)

Como afirmado anteriormente, definem o protótipo como “uma aproximação de um produto ao longo de uma ou mais dimensões de interesse” e sob essa definição qualquer entidade pode ser entendida como um protótipo, desde que exiba ao menos um aspecto do produto que seja interessante aos projetistas. Dessa forma contempla formas tão diversas quanto desenhos, modelos matemáticos, simulações, componentes de teste e, também, versões de pré-produção totalmente funcionais de um produto. Definem ainda: “a ‘prototipagem’ é o processo de desenvolver uma dessas aproximações de um produto”.

Segundo os autores, protótipos podem ser classificados ao longo de duas dimensões: seu nível de **abstração** e seu grau de **abrangência**¹⁰. Ao longo da primeira dimensão, protótipos variam entre os polos das manifestações **físicas** e as **analíticas**, ou abstratas. Protótipos físicos são artefatos tangíveis, criados para se assemelharem a um produto. Aspectos dele são efetivamente embutidos no artefato para testes e experimentos. Exemplos incluem modelos que “se parecem com¹¹” o produto (semelhante ao “protótipo visual” de Chartier e Badev) e os “protótipos de prova-de-conceito”, aqueles usados para validar a funcionalidade de um produto. Na Figura 4 são demonstrados três protótipos físicos usados no desenvolvimento de um

⁸ A primeira edição do livro é de 1995, mas atualmente está na sexta versão. No presente trabalho foi consultada a quinta edição, de 2012.

⁹ A língua inglesa permite que um substantivo se torne um verbo sem alterar seu sufixo. Contudo, em português, é necessário transformar a palavra “protótipo” em “prototipar” para esse fim. Essa forma foi empregada no presente trabalho.

¹⁰ A palavra “*comprehensive*” traduzida literalmente significa “compreensivo”. Contudo, nesse caso (e em diversos outros) ela é usada para designar o quão abrangente um protótipo é em sua representação de um produto. Por isso preferiu-se traduzir “*comprehensiveness*” como “abrangência” e “*comprehensive*” como “abrangente”.

¹¹ Em inglês: *looks-like*

robô de aplicações militares desenvolvido pela empresa iRobot. O da esquerda é um protótipo “se parece com”: um modelo fabricado por impressão 3D de plástico e pintado para se assemelhar ao produto. O do meio é um “protótipo funcional” de uma roda sendo usado em um ensaio de esforços físicos e o da direita é um protótipo funcional de todo o sistema em uma avaliação de tração em solo arenoso.

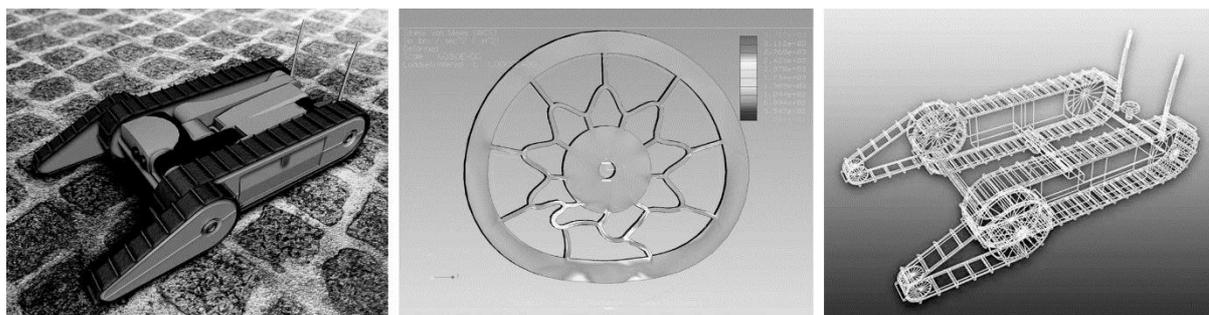
Figura 4 – Exemplos de protótipos físicos usados em um projeto da iRobot



Fonte: ULRICH, EPPINGER, 2012, p.292

Protótipos analíticos, por sua vez, são aqueles que representam um produto de forma intangível, normalmente de maneira matemática ou visual. Aspectos interessantes do produto são analisados ao invés de construídos. Exemplos incluem simulações computacionais, sistemas de equação em uma planilha e modelos tridimensionais virtuais. Na Figura 5 são apresentados três protótipos analíticos usados no desenvolvimento do mesmo robô citado anteriormente. Todos os três são modelos tridimensionais virtuais, sendo que o da esquerda foi utilizado para gerar uma imagem foto-realista para a apresentação do produto; o do meio é um modelo da roda em uma análise estrutural por computador; e o da direita foi usado em uma simulação do sistema de locomoção.

Figura 5 – Exemplos de protótipos analíticos usados em um projeto da iRobot

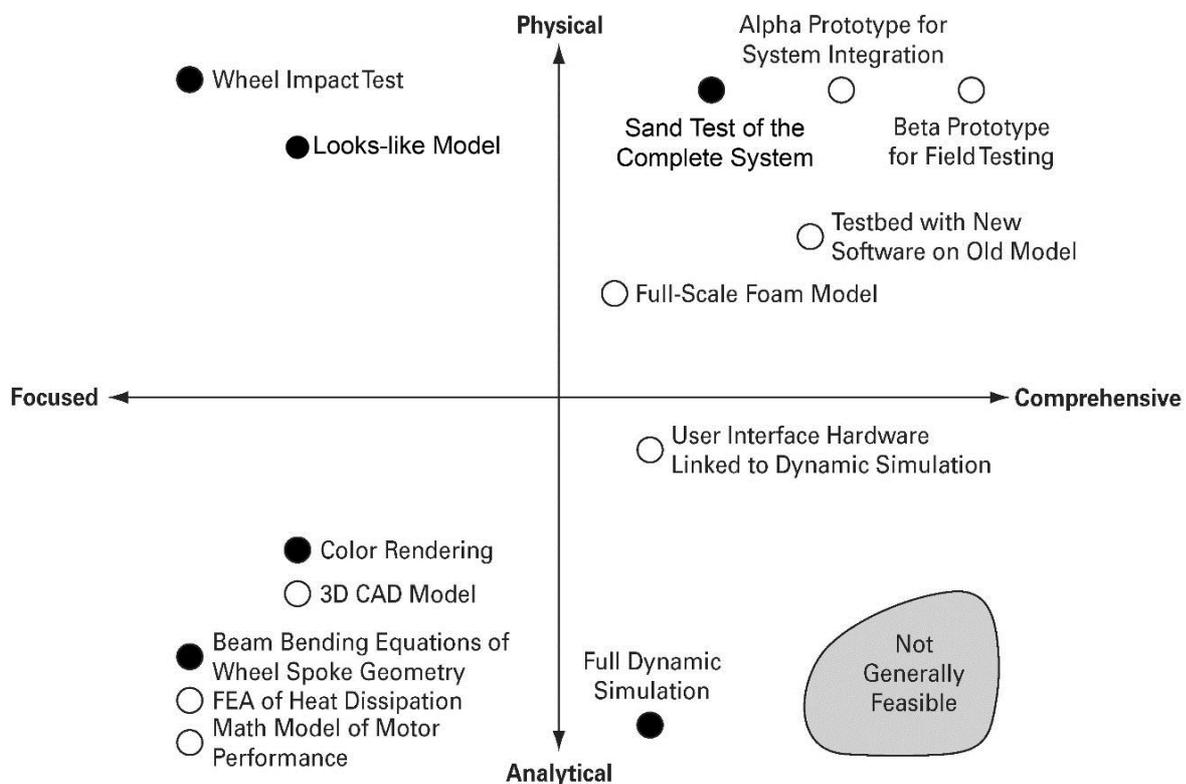


Fonte: ULRICH, EPPINGER, 2012, p.293

Já a segunda dimensão de aproximação contrapõe o quanto um protótipo é “abrangente” ao invés de “focado”. Protótipos abrangentes implementam a maioria de, senão todos, os atributos de um produto e correspondem, aproximadamente, ao significado corriqueiro que se atribui à palavra “protótipo”: a primeira versão em escala real e plenamente operacional de um produto.

Em contrapartida, protótipos focados implementam apenas um, ou alguns, dos atributos de um produto. Exemplos incluem modelos de isopor e outros materiais baratos usados para explorar uma forma de um produto – equivalentes aos “protótipos de estudo-da-forma” de Chartier e Badev – ou circuitos elaborados em placas de ensaio apenas verificar temporariamente o funcionamento dele. Uma prática comum é usar dois ou mais protótipos focados em conjunto para investigar o desempenho global de um produto, ao invés de protótipos abrangentes mais caros. Frequentemente um desses é um protótipo que “se parece com” e outro que “funciona como” o produto final. Dessa forma os projetistas conseguem tratar de questões com muito mais agilidade do que poderiam se tivessem que criar um protótipo abrangente.

Gráfico 5 – Tipos de *protótipos* classificados de acordo com seus graus de *abstração* e *abrangência*



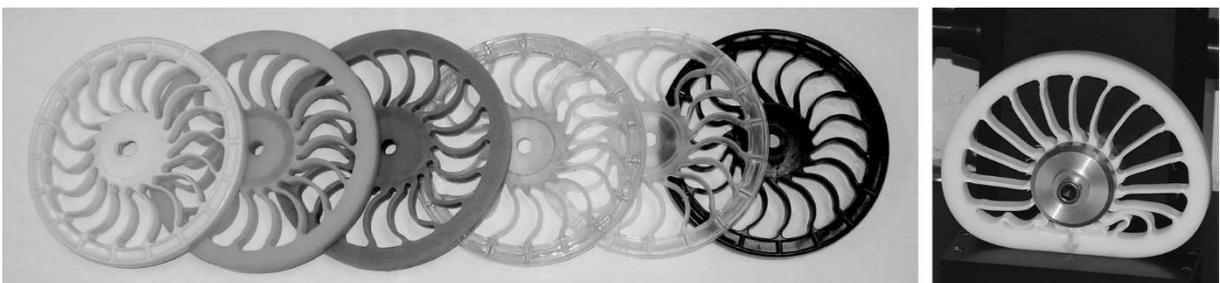
Os autores então demonstram como essas duas dimensões podem ser representadas graficamente, e mapeiam diversos tipos de protótipos que observaram no caso do robô da iRobot (Gráfico 5). Foi destacado, nos círculos pretos, os protótipos demonstrados nas imagens anteriores. Para Ulrich e Eppinger, quando usados no desenvolvimento de produtos físicos e tangíveis, como eletrodomésticos ou automóveis, protótipos “plenamente abrangentes” normalmente só são viáveis se forem físicos, pois ainda não é possível simular absolutamente todos os aspectos de um projeto em modelos computacionais. Por fim, pode-se combinar elementos analíticos e físicos em um só protótipo, como por exemplo, ligar o controle remoto físico do robô a um programa de simulação.

Além dessa classificação, os pesquisadores propõem ainda que a prototipagem serve a quatro propósitos:

- a) Aprendizagem;
- b) Comunicação;
- c) Integração; e,
- d) *Milestones*.

Na aprendizagem, são usados, geralmente, para responder a dois tipos de perguntas: “isso funcionará?” e “o quão bem isso atende às necessidades do cliente?”. Os autores retomam o exemplo da roda do robô para demonstrar como, através de uma série de protótipos e experimentos por esforços, os projetistas puderam aprender sobre o problema e aprimorar o projeto. A Figura 6, a seguir, demonstra uma sequência de versões da roda desenvolvidas e uma delas após um teste de esforços.

Figura 6 – Versões do projeto de roda e um *protótipo* após um teste



Fonte: ULRICH, EPPINGER, 2012, p.295

Protótipos também servem para enriquecer a comunicação entre projetistas, gerentes, vendedores, parceiros, clientes e investidores. Isso é muito evidente com protótipos físicos, pois um modelo visual, tridimensional e tátil de um produto é muito mais fácil de compreender do que descrições verbais ou mesmo desenhos.

Com a integração, a prototipagem assegura que os diversos componentes e sistemas de um produto funcionem em conjunto. Protótipos físicos e abrangentes são os mais efetivos enquanto ferramentas de integração porque exigem a montagem e conexão física de todas as partes que compõem o produto. Dessa forma, obrigam a coordenação entre os diferentes membros da equipe de projeto, uma vez que erros de compatibilização entre componentes ficam logo evidentes. Se uma parte interfere com o funcionamento geral do produto, ou com outras partes, o problema será logo detectado na fabricação ou na operação de um protótipo abrangente. Comumente esses são chamados de protótipos “alpha”, “beta” ou “de pré-produção”.

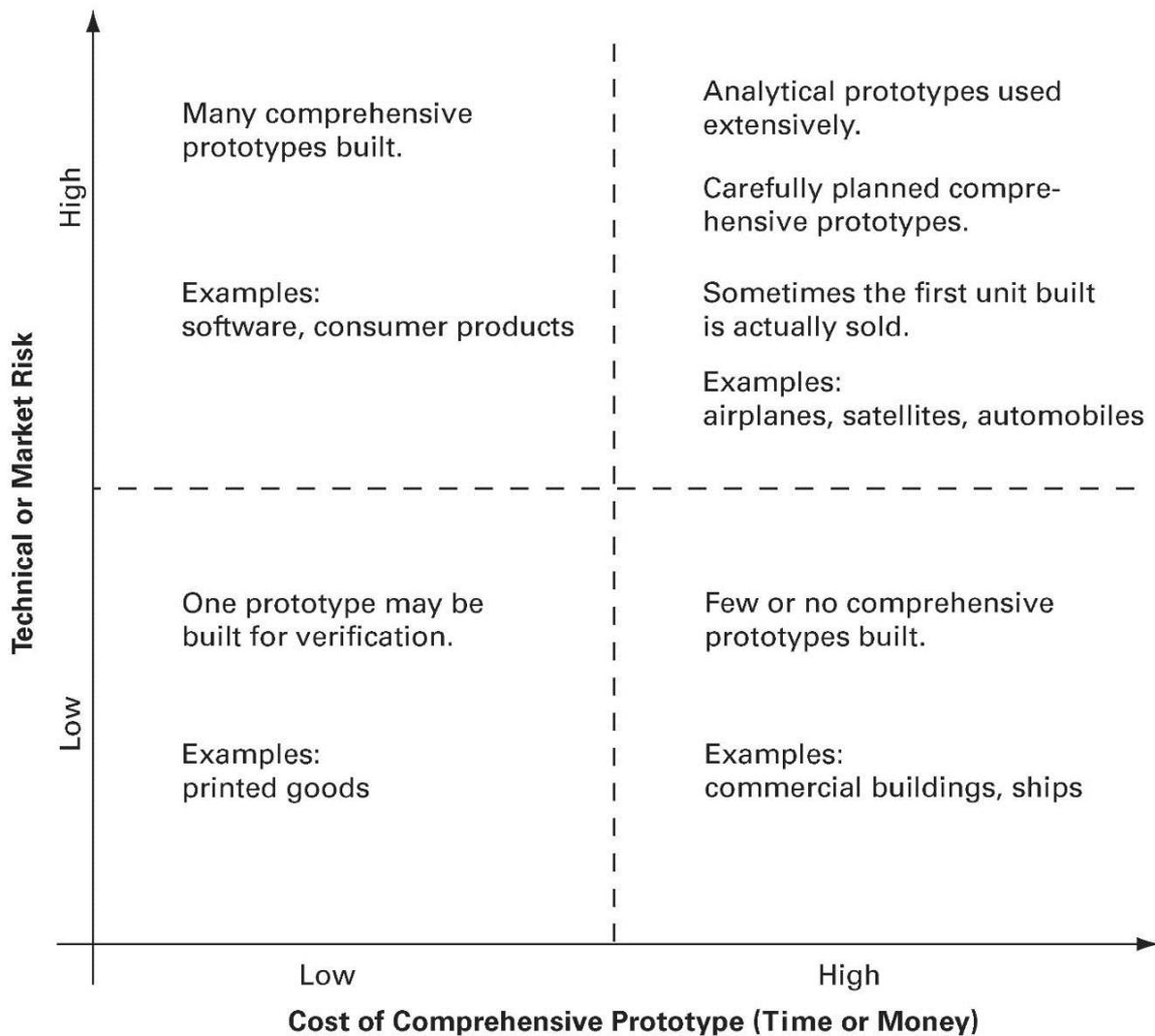
Muitas empresas de *software* usam-nos para garantir a integração entre as atividades de dezenas de desenvolvedores de programas. Dão o exemplo da Microsoft, que exige todos os dias que novas versões de *softwares* em desenvolvimento sejam compiladas ao final do expediente. Assim cada programador incorpora seu segmento ao programa global, testam uma nova atualização do programa diariamente e defeitos são logo detectados e corrigidos.

Protótipos servem também para a integração entre departamentos diferentes de uma companhia, por exemplo: um modelo visual pode servir para que setores de projeto, de *marketing* e de fabricação entrem em acordo sobre aspectos básicos de um produto.

Por sua vez o termo “*milestone*” significa literalmente “pedra de milha” ou “marcador de milha” em inglês. Em sua origem a palavra se remete às pedras colocadas na beira das estradas para marcar distâncias percorridas, porém, no contexto de um projeto significa um marco, portal ou fronteira de transição entre etapas do processo. Protótipos são usados como *milestones* ao demonstrarem que um produto atingiu um determinado nível de maturidade desejada, especialmente em etapas tardias do processo de desenvolvimento. Protótipos *milestones* provêm metas tangíveis, demonstram progressos e servem para impor calendários de prazos. Gerentes e clientes frequentemente exigem que um desses comprove certas funcionalidades antes de permitirem o prosseguimento de um projeto.

Os autores concluem o capítulo sugerindo uma série de “princípios da prototipagem”. No primeiro afirmam que protótipos analíticos são geralmente mais flexíveis que os físicos, pois são uma aproximação abstrata de um problema, e logo contêm variáveis que podem ser manipuladas facilmente para testar diversas soluções. Mudar um parâmetro em uma equação é mais fácil e rápido que mudar um atributo de um modelo físico. Por isso frequentemente os analíticos precedem aos físicos, afunilando o espectro de soluções possíveis, que podem então ser esmiuçadas através de uma quantidade reduzida de protótipos físicos.

Gráfico 6 – Uso de *protótipos abrangentes* em relação ao seu custo e ao risco dos tipos de projeto



Prosseguindo, afirmam que protótipos físicos são necessários para detectar fenômenos não antecipados. Frequentemente esses exibem reações completamente inesperadas e não relacionadas aos objetivos originais de testes e avaliações. Uma razão para tal é que todas as leis da física e outras condicionantes estão em operação durante o desenvolvimento e ensaio de protótipos físicos, enquanto os analíticos apenas incorporam aspectos pré-definidos pelos projetistas. Por isso, normalmente ao menos um protótipo físico abrangente é gerado no desenvolvimento de um produto.

Defendem ainda que a prototipagem pode reduzir o risco de iterações custosas, mas advertem que os benefícios esperados de um protótipo devem ser ponderados contra o tempo e os recursos necessários para fabricar e testá-lo, especialmente para protótipos abrangentes. Produtos que têm altos riscos de insucesso, devido ao uso de uma nova tecnologia ou pela própria natureza revolucionária dele, podem se beneficiar da prototipagem. Por outro lado, produtos em que o custo do fracasso é pequeno, ou cuja tecnologia é bem conhecida, não apresentam grandes ganhos através da prototipagem. A maioria dos casos, porém, se situa entre esses dois extremos. Os autores apresentam o Gráfico 6 onde plotam como diversos setores produtivos tipicamente se encaixam nesse espectro. Pode-se reparar que designam que edifícios comerciais, assim como navios, são produtos para os quais não se utiliza ou que quase não se utiliza protótipos abrangentes, supostamente devido ao baixo risco da operação e alto custo de fabricação.

Por fim os autores enfatizam como *softwares* CAD/CAE 3D¹² têm desempenhado com sucesso o papel de protótipos analíticos. Afirmam, inclusive, que em certos contextos o desenvolvimento de modelos tridimensionais virtuais elimina a necessidade de versões físicas; e, dependendo da indústria em que são aplicados, podem ser designados como “*mock-up* digital”, “protótipo digital” ou “protótipo virtual”.

1.3 Houde e Hill (1997)

Em um dos textos mais citados dentre os levantados, Stephanie Houde e Charles Hill (1997), *designers* e pesquisadores de HCI da empresa estadunidense

¹² CAD – *Computer Aided Design*.

CAE - *Computer Aided Engineering*

Apple, defendem que se deve definir a prototipagem de uma forma branda, pois ela assume características distintas em função do contexto de sua aplicação.

Afirmam, de forma abrangente, que protótipos “são qualquer representação de uma ideia projetual, independentemente de seu veículo” e que comumente são criados para representar diferentes estágios de evolução de um projeto e explorar opções ao longo dele (HOUDE, HILL, 1997, p. 369). Protótipos podem apontar direções alternativas de um projeto e assim permitem que projetistas avaliem suas opções; são usados para obter feedback com usuários; para facilitar a colaboração entre membros de uma equipe; e, também, como meio de se comunicar com pessoas externas à equipe de projeto.

Afirmam, porém, que o entendimento do que é um protótipo varia em função de cada profissão: pode ser um modelo de isopor para um *designer* industrial, uma simulação de uma interface digital para um *designer* de interface, um *software* teste para um programador, ou um *storyboard* para um especialista em estudos com usuários. Em certas organizações, somente são considerados protótipos os artefatos que comprovam que um produto pode ser fabricado com sucesso; em outras, somente aqueles com alto grau de resolução visual são aceitos.

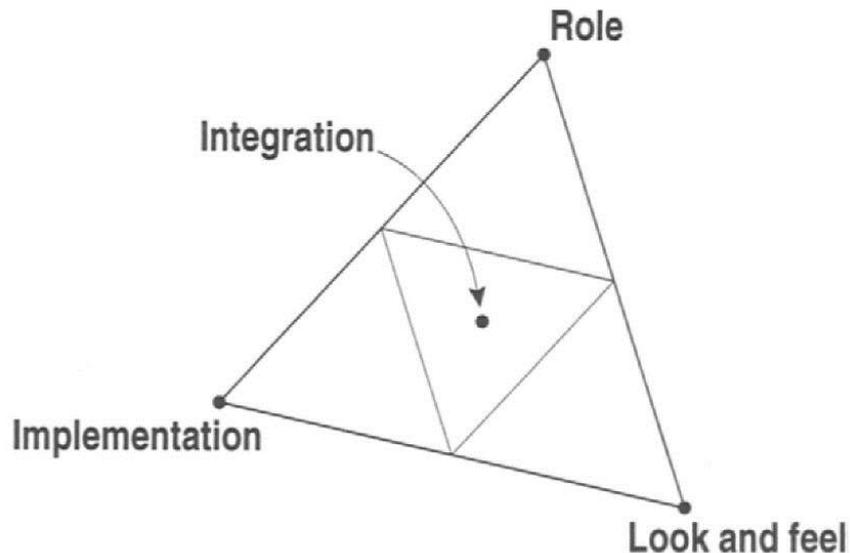
Um conceito comumente usado para classificar protótipos é o de **nível de fidelidade**. Protótipos que têm aparência ou funcionalidade próximas ao e um produto final são tidos como de alta-fidelidade, e os mais abstratos como de baixa-fidelidade. Os autores afirmam que o nível de fidelidade e a “resolução” são dois conceitos correlatos e os definem, respectivamente, como a “proximidade ao projeto final” e o “grau de detalhamento”. Normalmente é assumido que protótipos de alta-fidelidade indicam que um projeto está perto de seu final, mas nem sempre é o caso, pois podem ser usados em etapas iniciais para explorar algum aspecto chave do produto.

Os autores argumentam que a terminologia tipicamente usada para descrever esse tipo de ferramenta foca demais em atributos como a materialidade, o grau de detalhamento ou o nível de fidelidade, quando deveria, ao invés, se basear nas aplicações dos protótipos. O que é relevante, para eles, não é o seu veículo de manifestação ou as ferramentas usadas para criá-los, mas sim como são usados por projetistas para explorar ou demonstrar algum aspecto do produto futuro.

Protótipos provêm os meios de se examinar problemas de projeto e avaliar soluções; e a própria seleção do enfoque deles está relacionado à “arte de identificar as grandes incógnitas do projeto”. A escolha do tipo correto de protótipo e seu foco de análise são aspectos centrais à ferramenta.

O objetivo enunciado dos autores é o de estabelecer um modelo que descreva qualquer protótipo em função de seu papel no processo projeto, ao invés de seus atributos eventuais. Propõem para tal um “modelo do que protótipos prototipam” com três dimensões, e que pode ser representado graficamente, como a seguir.

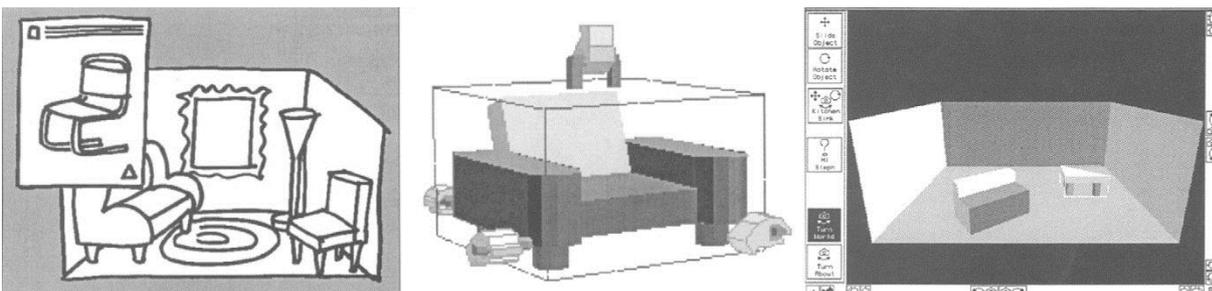
Gráfico 7 – Modelo do que protótipos “prototipam”



Fonte: HOUDE, HILL, 1997, p. 371

Protótipos podem ser classificados, como sendo mais ou menos representativos do **papel**, da **aparência e manuseio** ou da **implementação** de um produto em desenvolvimento. Cada uma dessas dimensões é representada no Gráfico 7 por um vértice do triângulo e corresponde a uma classe de questões relevantes aos problemas projetuais, que demandam abordagens específicas em sua resolução. Podem ser usados também para estudar diversas dessas dimensões ao mesmo tempo e quando o fazem de um modo mais ou menos equilibrado, servem ainda ao propósito da “integração” desses aspectos em uma solução única.

Figura 7 – Três *protótipos* de um *software* de desenho de ambientes em 3D

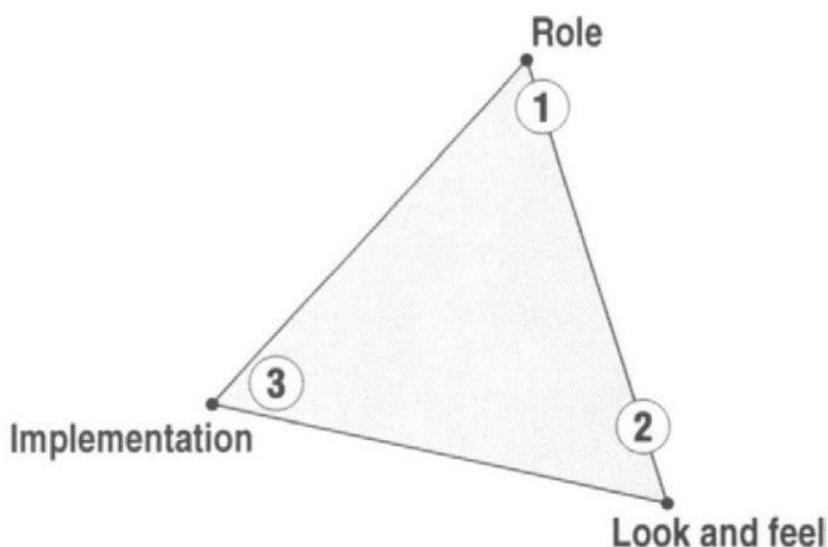


Fonte: HOUDE, HILL, 1997, p. 370-371

Para ilustrar a aplicação desse modelo, os autores apresentam uma série de exemplos de protótipos reais e suas classificações. Primeiramente apresentam três protótipos diferentes, mas que foram desenvolvidos para um só projeto de um software de desenho de ambientes em 3D, demonstrados na Figura 7, e mapeados no Gráfico 8, mais adiante.

O primeiro, da esquerda, consiste em uma série de desenhos esquemáticos feitos rapidamente para demonstrar como funcionaria o software: o usuário poderia selecionar móveis de um catálogo de opções e experimentar colocá-lo em um modelo do ambiente em questão. Os desenhos foram apresentados pelo projetista em uma sequência de slides organizados para simular como uma pessoa interagiria com o programa, mas sem de fato ser interativo.

Gráfico 8 – Três protótipos do *software* de planejamento de ambientes plotados no modelo proposto



Fonte: HOUDE, HILL, 1997, p.370

O objetivo desse protótipo foi somente o de apresentar a ideia global do produto para receber aprovação em uma reunião interna, sem exigir grandes esforços em seu desenvolvimento. O papel a ser desempenhado pelo produto era o foco de representação central do protótipo, porém ele também serviu para dar indícios de como seria a aparência do produto. Portanto, no modelo proposto, ele seria mapeado próximo ao vértice do “papel”, mas um pouco deslocado em direção ao vértice da “aparência e manuseio” (Gráfico 8, número 1).

Com o segundo protótipo (imagem do centro da Figura 7 e marcador número 2 no Gráfico 8), se buscava solucionar como se daria a manipulação dos objetos em um espaço virtual tridimensional através de um simples cursor de *mouse*. Após testes preliminares com modelos físicos de isopor, os projetistas concluíram que as operações de movimentação dos móveis que deveriam ser reproduzidas virtualmente eram: “deslizar”, “levantar” e “girar”. Com isso em mente, elaboraram um *software* relativamente simples onde simulavam apenas como se daria essa manipulação virtual e como seria a aparência aproximada da interface. Depois utilizaram esse protótipo de aparência e manuseio em uma série de experimentos com usuários para verificar se a interface era adequada ao fim desejado e aprimorar o projeto dela.

Já com o terceiro protótipo (Figura 7, à direita e Gráfico 8, número 3), os projetistas buscavam resolver a questão técnica de como gerar gráficos tridimensionais rápidos o suficiente para o uso proposto em um computador que fosse acessível a potenciais usuários. Esse protótipo não permitia a manipulação de diversos objetos, como no anterior, mas fornecia a visualização do ambiente como um todo e permitia a navegação por ele. A interface gráfica ainda não tinha sido completamente solucionada: os botões disponíveis foram criados pelos programadores apenas para poderem manusear o sistema eles mesmos. Esse protótipo ainda não era uma versão funcional do *software* mas ajudou a equipe a compreender qual nível de complexidade do modelo era viável tecnicamente para os computadores da época. Portanto a principal função dele foi explorar como poderia se dar a implementação do produto.

O desenvolvimento dos três se deu de forma mais ou menos paralela, sendo elaborados por membros diferentes da equipe durante as etapas iniciais do projeto. Um só protótipo não poderia ser desenvolvido naquele momento para representar todo o produto, pois a ideia ainda era muito difusa e havia ainda muitas questões em aberto. Com o decorrer do projeto, as funcionalidades do segundo protótipo foram incorporadas ao terceiro, gerando outros mais completos e que poderiam ser classificados como protótipos de integração.

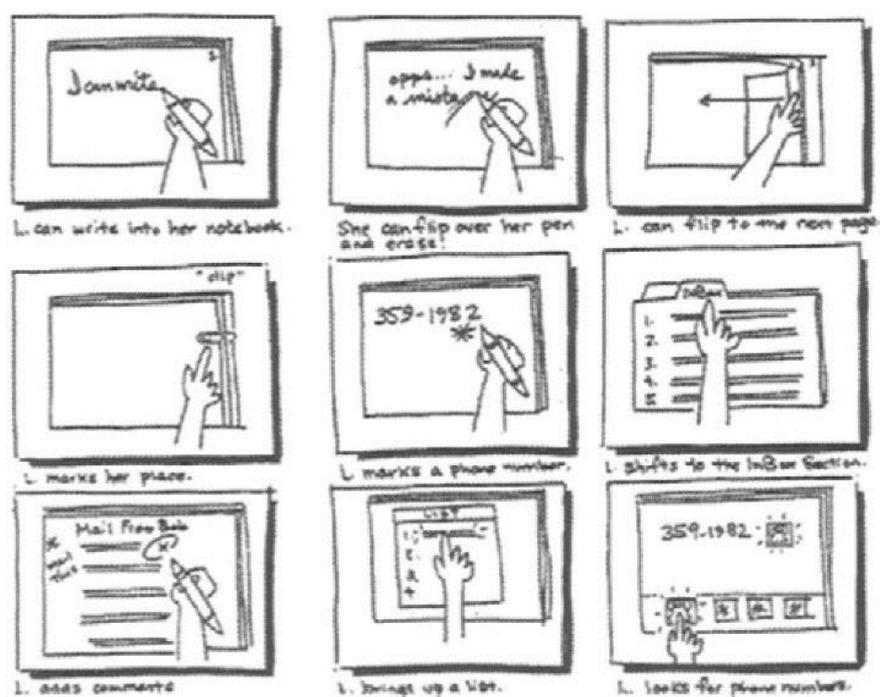
Elaborar diversos protótipos mais simples e focados permite que problemas específicos sejam abordados com maior facilidade e clareza. Esse é um método comum de tratar um problema, principalmente em etapas iniciais e exploratórias de um projeto. Com o avanço do processo, protótipos cada vez mais complexos e completos podem ser elaborados.

Após essa primeira explanação, Houde e Hill aprofundam suas definições, dando mais exemplos de cada dimensão de classificação de seu modelo. Fazem ainda algumas ponderações acerca da aplicação prática de cada tipo de protótipo.

1.3.1 Papel

Protótipos que focam no papel de um produto são aqueles que investigam o que ele pode fazer por um usuário. Descrevem funcionalidades que podem beneficiar a ele, sem muita preocupação em como essa solução se parecerá ou como de fato irá ser posta em prática. São úteis para demonstrar qual o objetivo global do projeto, com pouco esforço para o desenvolvimento de mecanismos e detalhes complexos. Um tipo de protótipo que comumente aborda essa dimensão é o *storyboard*, como o da Figura 8. Nele é descrita uma proposta, de 1990, de um *notebook* para estudantes que permitiria a interação através de toques de dedo ou caneta, como hoje é feito com *tablets* e *smartphones*.

Figura 8 – *Storyboard* que demonstra o papel de um novo *notebook* com manuseio por toque

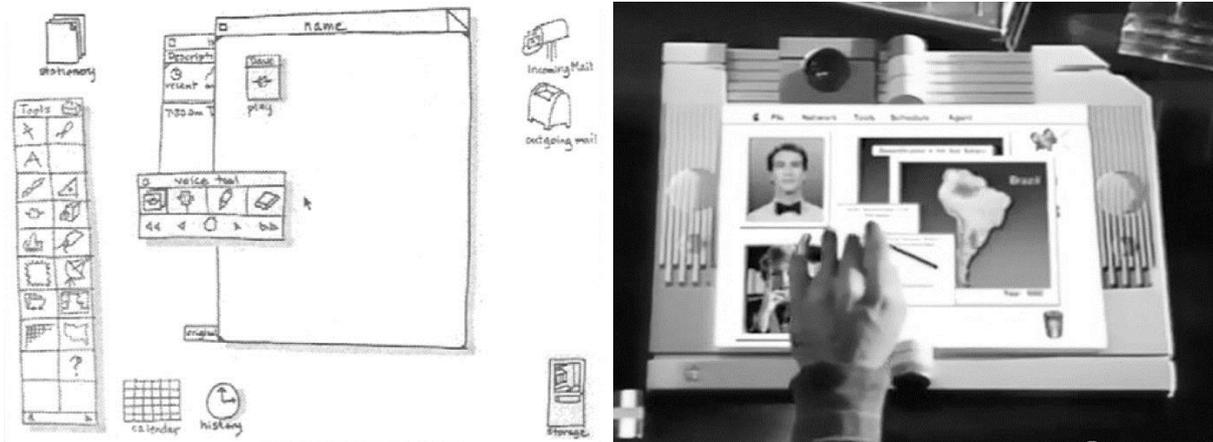


Fonte: HOUDE, HILL, 1997, p. 372.

Protótipos como esse são ferramentas eficientes pois enfatizam as discussões sobre o papel do produto logo no início do projeto e com pouco investimento no seu desenvolvimento. Contudo, dar-lhes o status de protótipo não é comum, pois o seu veículo de manifestação - o papel - é distante daquele do produto final que busca representar. Os autores, porém, o consideram um protótipo pois é uma “representação concreta de uma ideia de projeto e serve ao propósito de explorar suas questões” (HOUDE, HILL, 1997, p. 372).

Os autores ainda defendem que, dependendo do tipo de público a que se destina, esse tipo de protótipo pode ser mais ou menos detalhado em sua formulação e apresentam dois exemplos, representados na Figura 9, a seguir.

Figura 9 – Dois protótipos, de graus de resolução diferentes, expõem o papel de produtos propostos



Fonte: HOUDE, HILL, 1997, p. 373.

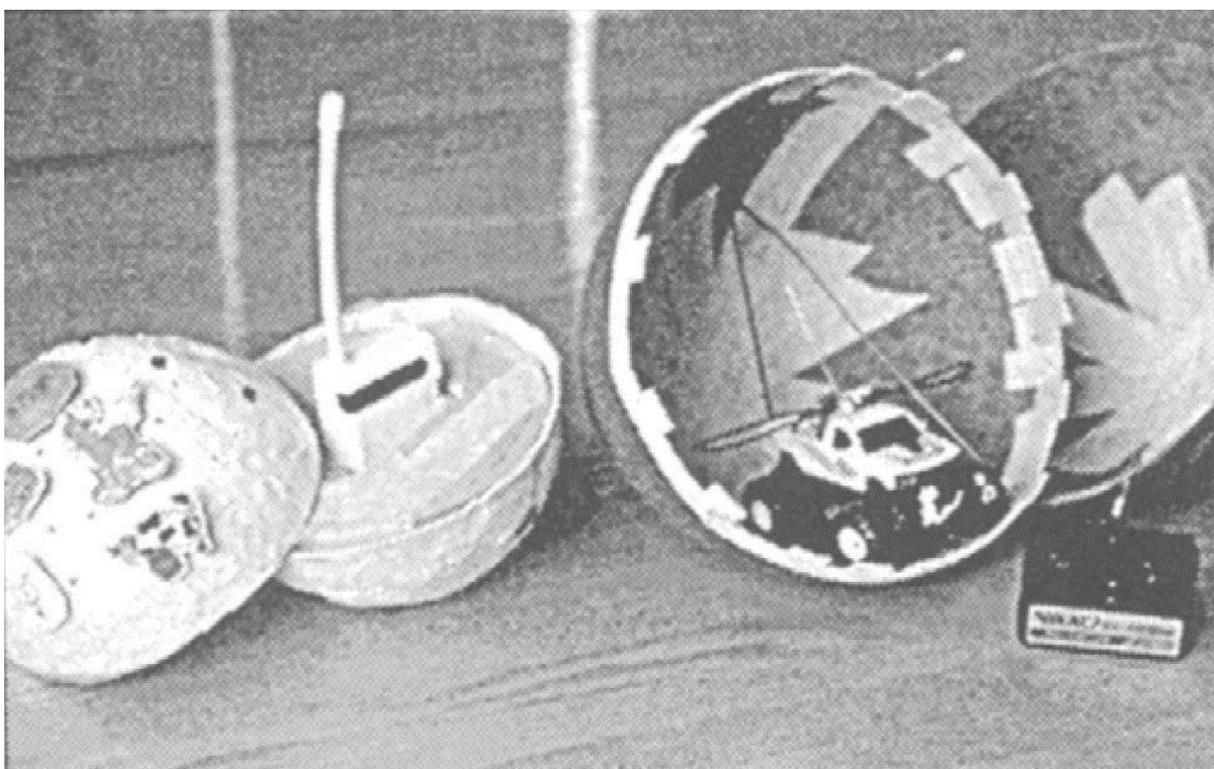
O primeiro, à semelhança do *storyboard* anterior, é composto por uma série de desenhos a mão, mas que foram organizados em uma apresentação sequencial de slides que demonstra como a interface gráfica de um sistema operacional poderia ser manipulada. O segundo, por sua vez, é um filme - com atores reais e animações por computação gráfica - onde é apresentado o conceito de um assistente virtual que auxilia um usuário buscando informações, lembrando-o de datas, e lhe conectando a chamadas de vídeo, tudo através de interações verbais. Devido aos efeitos especiais empregados, o vídeo, de 1987, parecia exibir um produto real, contudo as condições tecnológicas não permitiriam o desenvolvimento de algo semelhante por muitos anos ainda.

Ambos esses protótipos exploram e apresentam o papel de um produto proposto, contudo, exibem graus divergentes de detalhamento e resolução em função do público para quem foram concebidos. O primeiro foi elaborado apenas para uma apresentação interna à equipe de projeto e, portanto, tem um nível de resolução muito esquemático uma vez que seria visualizado apenas por técnicos da área e que já estavam a par do projeto em desenvolvimento. Já o segundo foi feito para a divulgação pública e geral, demonstrando as ambições da Apple para o futuro de sua indústria. Logo buscava transmitir uma sensação de concretude, apesar de ser tecnicamente inviável de ser efetivamente desenvolvido naquele momento.

1.3.2 Aparência e manuseio

Protótipos desse tipo são criados principalmente para explorar questões acerca da experiência sensorial concreta do produto: aquilo que o usuário vê, sente e ouve quando o utiliza. Eles simulam como será visualmente e como será a interação com ele, sem necessariamente investigar sua utilidade ou funcionamento técnico. Normalmente são usados em experiências com usuários, para obter *feedback* e assim aprimorar interfaces. Uma de suas virtudes é de permitir o desenvolvimento de uma interface sem necessariamente exigir a implementação de complexas tecnologias subjacentes.

Figura 10 – Dois protótipos de aparência e manuseio do GloBall



Fonte: HOUDE, HILL, 1997, p. 375.

Um exemplo dado pelos autores é o “GloBall”: um brinquedo para crianças com o formato de uma bola com a capacidade de interagir verbalmente com elas e se movimentar por ambientes. Para fazer uma avaliação de como crianças efetivamente interagiriam com o brinquedo, mas sem ter de desenvolver os sistemas complexos que seriam necessários, os projetistas elaboraram dois protótipos simples para testar cada funcionalidade separadamente (Figura 10). Em um construíram uma bola com um rádio transmissor de voz dentro, que podia, portanto, reproduzir o que uma pessoa

falava de outro ambiente. O outro protótipo seguiu a mesma linha, mas contendo um carrinho de controle remoto em seu interior, que fazia a bola se movimentar.

Essa abordagem “Mágico de Oz”, como foi batizada pelos autores, conseguiu simular tecnologias complexas de uma forma simples, porém convincente. Permitiu, também, aos projetistas avaliarem seu efeito logo no início do desenvolvimento projeto, atestando a aceitação do produto por potenciais usuários, porém, sem passar pelo processo custoso e demorado de implementação das tecnologias necessárias para sua viabilização técnica.

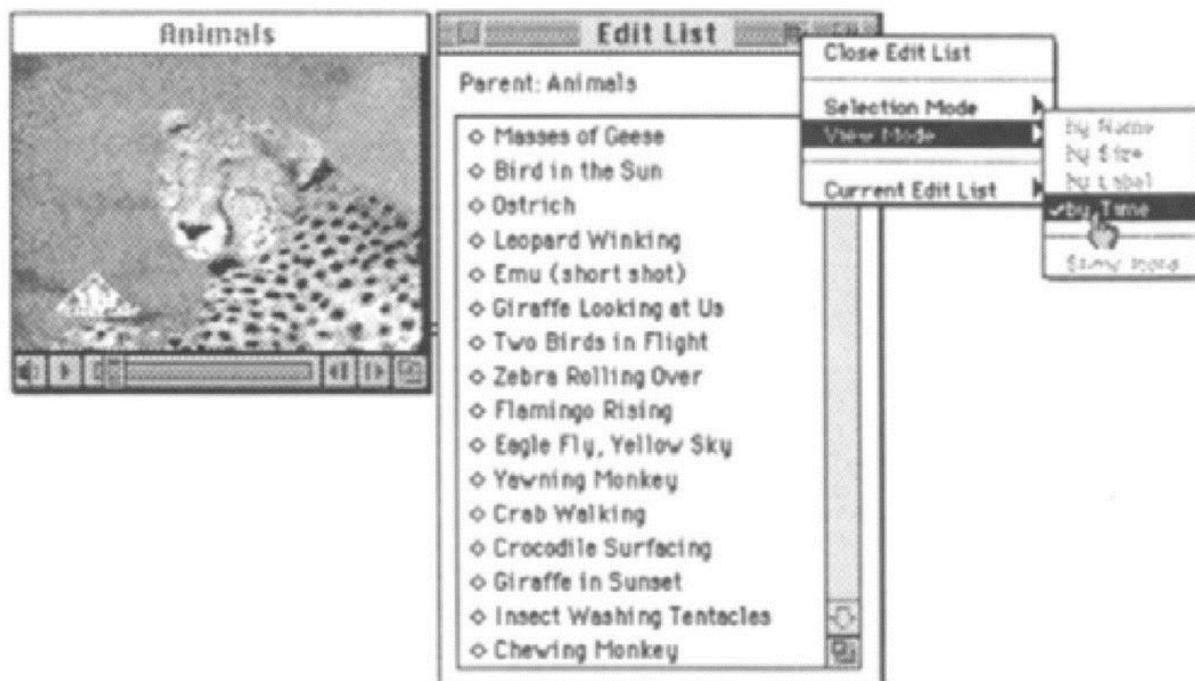
1.3.3 Implementação

Protótipos de implementação são feitos principalmente para resolver questões acerca de como produtos podem ser postos para efetivamente funcionar. São usados para explorar questões acerca da efetiva viabilização técnica e construtiva de um produto e como poderá se realizar a fabricação dele. Podem ser elaborados por projetistas como experimentos internos da equipe e, também, para comprovar para terceiros a viabilidade técnica de seu projeto.

Esse tipo de protótipo pode ser difícil de fabricar, e como eles efetivamente funcionam, comumente acabam tendo muitos aspectos incorporados ao projeto final. Contudo, dois problemas surgem dessa situação: podem acabar sendo muito caros ou difíceis de serem implantados, levando ao cancelamento do projeto; e, soluções temporárias desenvolvidas para eles podem acabar nunca sendo revisadas até o lançamento do produto.

Como exemplo dessa classificação, os autores apresentam um protótipo de um *software* de edição de vídeos que foi desenvolvido para testar as diversas ferramentas de edição que deveria oferecer (Figura 11). A principal preocupação com ele era o desenvolvimento dos códigos de programação das ferramentas; já a interface gráfica foi elaborada apenas para a visualização pelos próprios programadores. Como não foi feita para ser vista por terceiros, essa interface sofreu críticas em uma apresentação para membros externos à equipe de projeto, sendo taxada de confusa e difícil de manusear. Houde e Hill enfatizam que, na apresentação de protótipos de implementação, projetistas precisam tomar o cuidado de explicar de antemão ao seu público o objetivo daquele artefato, e deixar evidente quais aspectos estão sendo analisados naquele momento e quais são apenas esquemáticos.

Figura 11 – Protótipo de implantação de um software de edição de vídeos



Fonte: HOUDE, HILL, 1997, p. 376.

1.3.4 Integração

Protótipos de integração são feitos para representar a experiência completa de um usuário. Combinam em uma só representação o papel, a aparência e manuseio e a implementação de um produto. Protótipos integrados ajudam projetistas a equilibrar e mitigar os limites impostos pelas diferentes dimensões, verificando que o projeto é completo e coeso. São os mais capazes de simular o funcionamento final do produto e, portanto, normalmente são tão complexos quanto ele, exigindo muito tempo e esforço de desenvolvimento. Esse tipo de protótipo é equivalente ao Protótipo Funcional, de Chartier e Badev.

Houde e Hill concluem fazendo algumas breves sugestões:

- a) Protótipos eficientes produzem respostas às questões mais importantes para os projetistas na menor quantidade de tempo. As vezes representações muito simples se tornam protótipos muito efetivos.
- b) Deve-se fabricar muitos protótipos, estar disposto a jogar fora alguns e usar variadas ferramentas. Uma vez que podem ser muito

complexos, normalmente é impossível criar um protótipo integrado em fases exploratórias.

- c) O conhecimento do público alvo é essencial, pois o nível de resolução e de fidelidade dos protótipos deverá estar de acordo com ele.
- d) É necessário conhecer o protótipo, preparar o público e ser claro sobre quais são e quais não são as questões projetuais sendo exploradas. O artefato em si não necessariamente comunica seus propósitos, principalmente a pessoas externas às equipes de projeto.

1.4 Lim, Stolerman e Tenenberg (2008)

Youn-kyung Lim, do Desenho Industrial, e Eric Stolerman e Josh Tenenberg, das Ciências da Computação, afirmam que protótipos desempenham dois grandes papéis: o de “filtro” e o de “manifestação de ideias projetuais”.

Prototipagem é uma atividade com o propósito de criar uma **manifestação** que, em sua forma mais simples, **filtra** as qualidades nas quais projetistas estão interessados, sem distorcer o entendimento do todo. [...] Protótipos são **filtros** que atravessam um espaço projetual¹³ e são **manifestações** de ideias projetuais que concretizam e externalizam ideias conceituais. (2008, p. 4. Tradução e grifo nosso)

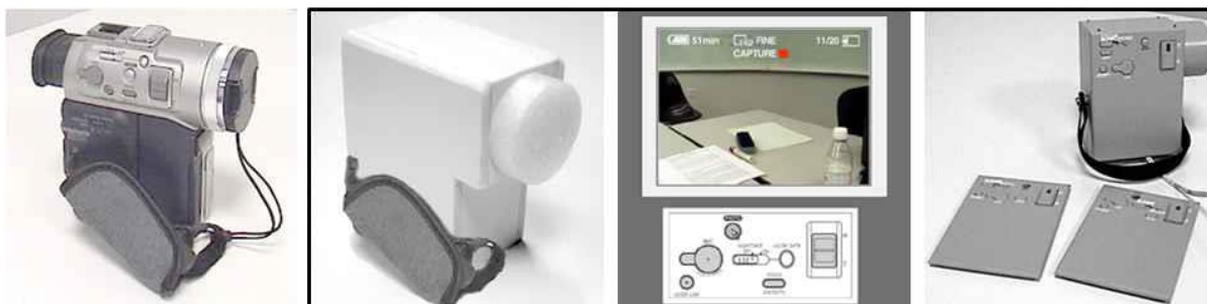
Defendem que quando incompleto e, portanto, representando apenas parcialmente um projeto, um protótipo age como filtro e diminui a quantidade de dimensões de análise do projetista. Dessa forma simplifica o problema abordado para que ele possa focar apenas em aspectos relevantes àquele momento.

Na Figura 12, a seguir, são demonstrados três protótipos usados no projeto de uma câmera de vídeo (imagem da esquerda) que filtram diferentes aspectos em desenvolvimento: um protótipo tridimensional de isopor usado para estudar a forma ergonômica geral do produto (segunda imagem); uma tela de vídeo para avaliar a interface digital da câmera (terceira imagem); e uma forma tridimensional com painéis removíveis e funcionais para testar diferentes layouts dos botões físicos (direita).

¹³ Do inglês “*design space*”

Fica evidente como os protótipos foram deliberadamente criados para ignorar certas qualidades do projeto e focar em outras durante o processo de concepção. O protótipo enquanto filtro nos abriga a considerar, de forma selecionada, as diversas realidades: técnica, estética, construção, relação com usuários, interação entre sistemas etc.

Figura 12 – Um produto e três protótipos que filtram aspectos diferentes para o desenvolvimento



Fonte: LIM, STOLTERMAN, TENENBERG, 2008, p.9

Já enquanto manifestação de ideias projetuais, protótipos tangibilizam o projeto, materializando e externalizando o raciocínio por trás dele. Possibilitam a visualização da relação futura do objeto projetado com o mundo ao redor e, também, a previsão e avaliação de seus impactos. Quando um projetista materializa uma ideia, ele a desenvolve ao movê-la para fora de sua mente e para o mundo através de uma manifestação. Essa manifestação pode tanto ser física (maquetes, desenhos, ensaios de materiais etc.), quanto abstrata (modelos virtuais, planilhas, simulações por computador etc.).

Muitos estudos tratam da relevância dos desenhos no processo projetual ao darem forma a pensamentos fora de nossas mentes e registrando ideias como uma espécie de memória externa. Assim, permitem uma espécie de relação dialética e reflexiva entre o projetista e o projeto. O ato de materializar pensamentos é central ao processo criativo e essa externalização permite diversas operações perceptivas e cognitivas que levam à crítica, reflexão e iteração. Os autores defendem que esse também é um papel da prototipagem, até porque sua definição de protótipo inclui os desenhos.

Dessa forma, a ideia manifestada através de protótipos se torna uma debatedora e colaboradora que nos ajuda a entender e examinar nossos próprios pensamentos, ações e intenções. A geração sequencial de protótipos se entrelaça com a evolução das ideias ao longo do processo projetual; constantemente se reavalia

as soluções propostas através deles e cada iteração se torna um registro das diversas decisões, modificações e exigências que incidem sobre o projeto. Projetistas comunicam seu raciocínio através de protótipos que por sua vez lhes estimulam a reflexão e auxilia a enquadrar, refinar e descobrir novas possibilidades no projeto.

Lim, Stolerman e Tenenberg defendem que protótipos são fundamentalmente diferentes do produto, mesmo que sejam absolutamente idênticos, pois são ferramentas de projeto e não o objetivo final do processo. A intenção do projetista ao gerar protótipos é diferente daquela que tem ao formular o projeto final: um serve para explorar ou avaliar soluções e assim contribuir para que atingir a versão final do outro.

Retomam a questão de outros autores do nível de fidelidade e afirmam que essa qualidade, junto à materialidade e ao escopo são as “dimensões de manifestação dos protótipos”. Essas influenciam a atuação deles enquanto ferramenta projetual, não tanto em função de sua semelhança ao produto final, mas sim de sua utilidade em gerar e avaliar ideias.

Afirmam que o nível de fidelidade tem sido o enfoque de tantos estudos porque está intimamente relacionado com os custos da prototipagem. Por isso, há tantos trabalhos que tentam enfatizar as vantagens de se desenvolver protótipos de baixa fidelidade, como os protótipos de papel, afinal são mais baratos que os mais completos. Apontam, porém, que é também determinante em como protótipos são usados no desenvolvimento de projetos. Os de baixa fidelidade normalmente são utilizados para a exploração projetual e para a comunicação, mas não servem tanto para testes *in situ* e avaliações formais. Nessas aplicações são mais adequados os de alta fidelidade.

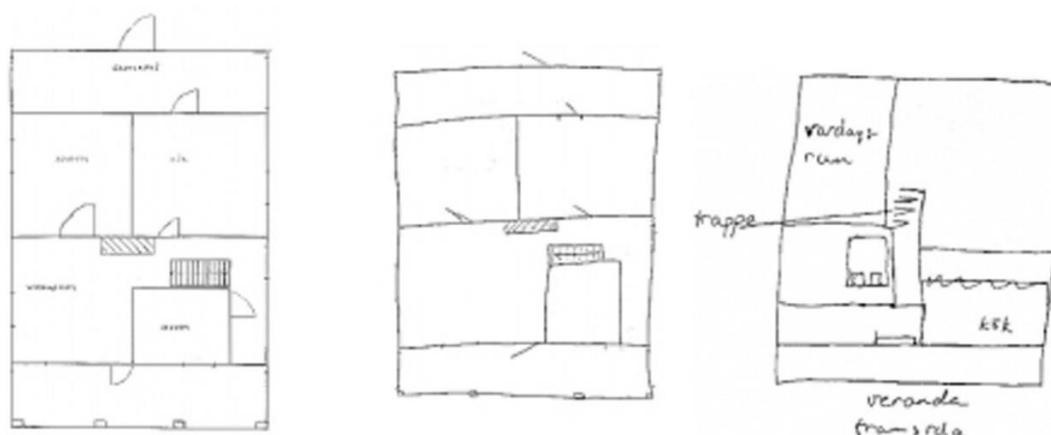
Os autores ainda citam um estudo que demonstra a relação entre essas dimensões de manifestação dos protótipos, os aspectos filtrados e os impactos que ambos têm no entendimento e na percepção das pessoas sobre o projeto. Nesse estudo, Skog e Soderlund (1999) organizaram um experimento onde foi apresentado um mesmo projeto de uma casa a dois grupos de participantes e com dois protótipos diferentes. O primeiro era um simples desenho técnico impresso: uma planta-baixa da casa¹⁴, indicando a organização espacial e representando dimensões e relações entre espaços e elementos de forma precisa. O segundo protótipo era uma modelo

¹⁴ Nesse trecho é evidenciado como existem diferenças de terminologia entre variadas disciplinas. Para esses autores, do Desenho Industrial e das Ciências da Computação, uma planta baixa é entendida como um protótipo, já para profissionais da Construção Civil essa definição causa estranheza.

tridimensional, visualizado através de uma tela de computador, que permitiu aos participantes “caminharem” pela casa através dos espaços.

Apesar de ambos os protótipos representarem a mesma casa, as diferentes formas de manifestação e os diferentes aspectos filtrados levaram a entendimentos sensivelmente divergentes nos participantes do experimento. No modelo virtual tridimensional, foram levados a perceber os espaços de uma forma mais intuitiva e com isso ganharam um entendimento melhor da aparência da casa e de como seria “estar dentro” dela. Já com a planta, as relações geométricas entre os espaços eram mais bem compreendidas, mas a percepção espacial não.

Figura 13 – Planta-baixa original da casa e desenhos da planta feita por participantes do estudo



Fonte: SKOG, SODERLUND, 1999, p. 8

Como resultado disso, os participantes demonstraram claras diferenças de entendimento do projeto. Em uma posterior descrição da casa, aqueles que manusearam a planta-baixa usaram uma linguagem com palavras que delineavam o layout e as relações geométricas entre os ambientes, como por exemplo: “a cozinha parece menor comparada à sala”. Já os que interagiram com o modelo tridimensional comentaram mais sobre a aparência externa da casa, sobre como se “sentiam dentro da casa”, se os espaços pareciam amplos ou apertados etc. Em geral se expressavam como se tivessem estado fisicamente dentro da casa.

Contudo, quando se pediu deles que desenhasssem a planta-baixa da casa, ficou evidente que o primeiro grupo havia adquirido um entendimento melhor das proporções dos espaços. A Figura 13 demonstra (da esquerda para a direita) a planta-baixa original da casa, uma planta desenhada por um membro do primeiro grupo e outra desenhada por um participante que interagiu com o modelo tridimensional. Claramente, o participante desse último grupo não compreendeu de uma forma

precisa a relação entre espaços, apesar de ter tido uma imersão “física” melhor. Percebe-se como o entendimento do projeto é condicionado pela forma de manifestação dos protótipos e por quais aspectos foram filtrados através deles.

1.5 Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler (2018)

Em um artigo recente intitulado *What is a Prototype? What are the Roles of Prototypes in Companies?* (2018, p. 1), 2.5. Lauff e Kotys-Schwartz, da Engenharia Mecânica e Rentschler das Engenharias Mecânica e Biomédica, seguindo a indicação de Houde e Hill, enunciaram inicialmente que protótipos são “qualquer manifestação de um projeto”. Nesse estudo, realizaram uma pesquisa etnográfica em que acompanharam o uso efetivo de protótipos em três empresas: uma de aparelhos eletrônicos, outra de calçados e uma de equipamentos médicos. Acabaram por reelaborar sua definição a partir dos dados observados e chegaram à seguinte definição:

Um protótipo é a incorporação física ou digital dos elementos críticos do projeto pretendido, e, também, uma ferramenta iterativa¹⁵ para **eleva a comunicação, possibilita a aprendizagem, e informar a tomada de decisões** em qualquer ponto do processo projetual.

A prototipagem é o processo de criação de incorporações físicas ou digitais dos elementos críticos do projeto pretendido. (2018, p. 9. Tradução e grifo nossa)

Essa enunciação foi elaborada de forma propositalmente branda para que pudesse contemplar o amplo espectro de aplicações da ferramenta observadas na prática; desde a geração de ideias preliminares até a representação completa de produtos e serviços finais. Ela contém a expressão “física ou digital” em reconhecimento aos diferentes veículos e níveis de fidelidade observados: desenhos bidimensionais (manuais e digitais), textos, códigos de programação, protótipos de papel, maquetes de isopor, perspectivas computadorizadas, impressões 3D de plástico, visualizações em realidade virtual e jogos/dinâmicas em grupo.

Para os autores, protótipos são artefatos complexos e dinâmicos que moldam as interações sociais que ocorrem durante um processo projetual. A partir de suas observações, entendem que esses artefatos são tanto ferramentas quanto atores do processo, impactando e definindo-o. Enquanto ferramentas são usados para

¹⁵ Iterativo: reiterado, repetido, feito repetidamente.

desempenhar funções intencionais, em tarefas específicas como a coleta de informações relevantes e a validação de ideias projetuais. Já enquanto atores, moldam as relações sociais que ocorrem durante um processo projetual, de modo intencional ou não. Em sua forma não-intencional podem, por exemplo, simplesmente ser deixados à mostra em um ambiente de trabalho e vir a suscitar discussões informais a respeito do estado atual de um projeto, o que por sua vez determina o direcionamento dali em diante. Também podem ser desenvolvidos de forma a intencionalmente representar algum ou todos os aspectos de uma solução para uma etapa de avaliação, reunião ou teste.

Essa perspectiva proposta por Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler é baseada em uma estrutura conceitual derivada da *Teoria Ator-Rede*¹⁶, e enxerga o artefato protótipo como um agente ativo e determinante nas interações sociais que ocorrem entre diversos atores: projetistas, clientes, usuários, poderes públicos, fabricantes, cidadãos etc. Propõem uma visão menos focada nos atributos específicos de cada protótipo, como ocorre na maioria das pesquisas sobre o tema, e mais na forma com que afetam as ações do processo projetual. O protótipo então é visto como uma forma de linguagem ou mediador que facilita a comunicação, a aprendizagem e a ação decisória dos atores envolvidos; possibilitando o entendimento compartilhado deles sobre o projeto.

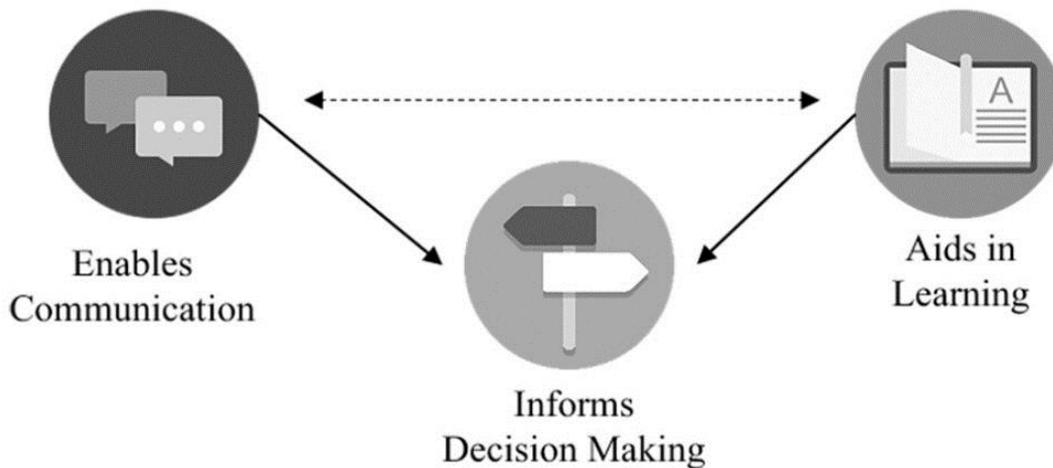
Para esses pesquisadores, protótipos apresentam uma grande variedade de usos e configurações em função dos contextos e áreas em que são aplicados. Contudo, ainda assim defendem que há aspectos típicos à prototipagem, comuns a todas as disciplinas, e que se baseiam na condição do protótipo enquanto manifestação ou materialização de ideias projetuais. Essa materialização é que permite a interação entre os diversos atores com as ideias projetuais, antes intangíveis, assim facilitando os processos de comunicação, aprendizagem e decisão.

Eles categorizam os protótipos segundo três grandes papéis que desempenham nos processos projetuais: **possibilitar a comunicação; auxiliar na aprendizagem;** e, **informar a tomada de decisões.**

¹⁶ A *Teoria Ator-Rede*, desenvolvida por Bruno Latour, Michel Callon e John Law, é uma abordagem teórica e metodológica das ciências sociais que entende que tanto pessoas quanto outros seres vivos e objetos inanimados são parte integral das redes de relações que compõem o mundo e que estão em constante transformação.

Os primeiros dois papéis podem se dar de forma paralela ou sequencial e servem de base ao terceiro em momentos críticos de definição ou redefinição das diretrizes de um projeto, conforme indicado na Gráfico 9. Um protótipo pode também abarcar múltiplos papéis de uma só vez e esses se desdobram em sub-papéis, enumerados a seguir.

Gráfico 9 – Os três papéis dos protótipos



Fonte: LAUFF; KOTYS-SCHWARTZ; RENTSCHLER, 2018, p. 10.

1.5.1 Possibilitar a Comunicação

Para os autores, um aspecto central dos processos de projeto é a “coordenação técnica”, conceito desenvolvido por James Trevelyan, e cujo sentido é exprimido na seguinte citação:

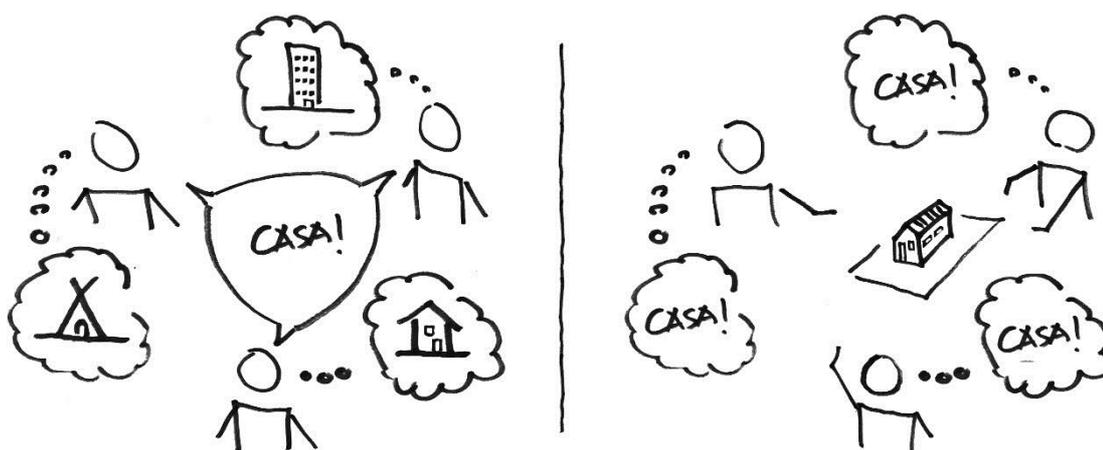
[...] a prática da engenharia é baseada na perícia técnica distribuída e ordenada através de interações sociais entre as pessoas: a engenharia depende da extração de diversas pessoas, de conhecimentos, especialidades e habilidades; muitos deles implícitos e não-escritos. Logo as interações sociais são centrais à prática profissional da engenharia (TREVELYAN, 2010, p.175. apud LAUFF, KOTYS-SCHWARTZ, RENTSCHER, 2018, p. 2. Tradução nossa).

Essa noção de coordenação técnica não é uma característica essencial apenas da engenharia, mas de todas as atividades projetivas que envolvem diversos atores interessados. Uma vez que as relações sociais, os meios de comunicação e as trocas formais e informais de informação são centrais a processos projetuais e decisórios em geral, toda e qualquer ferramenta que viabiliza ou facilita essas interações ganha uma relevância fundamental. A partir desse entendimento Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler defendem que o primeiro grande papel da prototipagem é o de possibilitar

ou facilitar a comunicação. Afinal, diversos conhecimentos técnicos, dos variados atores envolvidos ou interessados, são incorporados em, e manifestados por protótipos.

Protótipos possibilitam a comunicação eficaz e coesa ao implantar modelos mentais semelhantes em diversos atores, minimizando os erros de interpretação que comumente ocorrem em comunicações puramente verbais ou textuais (Figura 14). Ao materializar ideias e aspectos de um projeto, criam uma base compartilhada de observação e entendimento do problema, facilitando a comunicação entre os envolvidos e as discussões subsequentes sobre as soluções propostas. Essencialmente criam uma forma de linguagem projetual comum aos diversos atores.

Figura 14 – Protótipos geram um modelo mental comum



Fonte: Elaboração própria

Para os autores, existem quatro formas básicas de comunicação desempenhadas por protótipos: explicar um conceito; possibilitar o feedback; facilitar negociações, e; persuadir os outros. Frequentemente vários desses tipos de comunicação podem ocorrer a partir de um só protótipo.

Em uma reunião relatada na pesquisa, uma equipe de *designers* discutiu uma série de alterações no projeto de uma bota de neve para crianças através de protótipos (Figura 15) e os autores puderam observar alguns desses usos comunicativos. Os *designers* primeiro utilizaram os protótipos para demonstrar o estado atual do projeto, explicando, com os artefatos em mãos e apontando para detalhes deles, como determinadas características foram sendo alteradas ao longo do tempo; em específico como a gola da bota foi elevada em altura por uma exigência

técnica, e com isso alterou sua relação com outros detalhes. Estavam usando objetos físicos para explicar conceitos do projeto, que dificilmente seriam entendidos apenas verbalmente. Inclusive, com os protótipos em mãos, puderam se permitir o uso de termos informais e imprecisos que só podiam ser compreendidos quando contextualizados em referência a aspectos observáveis naqueles artefatos.

Figura 15 – Protótipos de bota de neve infantil



Fonte: LAUFF; KOTYS-SCHWARTZ; RENTSCHLER, 2018, p. 5.

Uma vez que todos na reunião conseguiram entender qual era o estado atual do projeto e como chegaram àquela configuração, assim formando uma base conceitual comum, o protótipo passou a servir para a discussão de alterações. O coordenador de desenvolvimento do produto, para quem eram apresentadas as botas, pôde pedir alterações e emitir opiniões a respeito do projeto, se referindo diretamente e manualmente a características dos protótipos, o que possibilitou seu *feedback* à equipe desenvolvedora. Nesse processo, tanto coordenador quanto projetistas puderam negociar alterações na solução a partir da manifestação dela no protótipo, novamente utilizando os artefatos para exemplificar suas ideias.

Na persuasão, são usados com o propósito de induzir terceiros a aceitarem uma proposta, o que talvez não fariam sem sua presença. Os autores citam o caso de uma das empresas estudadas que mantém um sistema onde qualquer funcionário pode propor ideias para novos produtos. Em uma reunião em que uma equipe multidisciplinar buscava selecionar propostas a serem desenvolvidas, foi observado como o simples fato de uma delas vir com um protótipo preliminar de prova-de-conceito a fez ser logo aceita e elogiada pela equipe. Ao mesmo tempo, outras propostas, que não apresentavam protótipos, mas só descrições textuais, foram rejeitadas sob o argumento de serem “incompreensíveis e desleixadas”.

1.5.2 Auxiliar a Aprendizagem

O segundo papel desempenhado pela prototipagem é o de auxiliar na aprendizagem sobre o problema em questão:

Uma afirmação que ouvimos múltiplas vezes e em várias formas em todas as companhias é que “protótipos ajudam a entender o que você sabe e o que você não sabe”. É fácil imaginar que um projeto irá funcionar perfeitamente na sua cabeça, e ao criar protótipos você consegue validar se essas ideias funcionam na realidade (LAUFF; KOTYS-SCHWARTZ; RENTSCHLER, 2018, p. 8. Tradução nossa).

Através desses instrumentos, projetistas podem explorar o binômio problema-solução, propondo soluções e avaliando-as, e assim desvendar os “aspectos desconhecidos” do problema e do projeto. Os autores citam um conjunto de conceitos, propostos por Sutcliffe e Sawyer (apud JENSEN, ELVERUM, STEINERT, 2017, p. 4), que se tornam evidentes em processos projetuais através do emprego de protótipos:

- a) “desconhecimentos conhecidos”¹⁷ - aspectos de um projeto que os projetistas já sabem que são uma incógnita ao iniciar o processo e assim buscam desvendá-los;
- b) “conhecimentos desconhecidos”¹⁸ - conhecimentos que os projetistas já detêm, mas que só se tornam evidentes ao longo dos processos projetuais e de prototipagem;

¹⁷ *Known unknowns*

¹⁸ *Unknown knowns*

- c) “desconhecimentos desconhecidos”¹⁹ - as incógnitas que os projetistas sequer cogitam existir ao iniciar o projeto e que só passam a ser entendidos a partir do desenvolvimento desse, mesmo que não sejam totalmente resolvidas (se tornando assim desconhecidos conhecidos).

Segundo Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler, existem quatro categorias de conhecimentos que são adquiridos através da prototipagem, aqueles sobre o “espaço projetual”²⁰, incluindo aí produtos e tecnologias semelhantes que podem apontar para novas soluções; sobre as exigências técnicas do projeto; as preferências, interesses e comportamentos de usuários potenciais; e, questões mercadológicas, como custos de materiais e de processos.

Afirmam que um modo de aprender sobre um projeto é analisar produtos semelhantes ao pretendido em uma engenharia reversa. A revisão sobre o estado-da-arte de um tema é um método corriqueiro de se adquirir conhecimento prévio sobre um problema. Profissionais evitam retrilhar caminhos já andados por outros, se baseando no conhecimento acumulado de esforços alheios. Esse método é potencializado na engenharia reversa, pois ao se tentar reconstruir um produto de referência, variadas exigências técnicas e procedimentos de fabricação terão de ser necessariamente perpassados e diversos aspectos desconhecidos desta solução se tornarão evidentes. Para os autores, esse método também é uma forma de prototipagem, porém nesse caso o objetivo não é chegar ao projeto final em si, mas sim tentar deduzir quais foram as considerações e restrições dos projetistas originais que levaram àquela configuração.

Para exemplificar essa questão, foi relatado um processo de engenharia reversa executado pela equipe que desenvolvia a bota infantil, discutida anteriormente. Nele, os projetistas ponderavam modos de fabricar em massa o produto do modo mais econômico o possível ao mesmo tempo que precisavam contornar algumas dificuldades técnicas. Partiram então para comprar e destrinchar uma bota semelhante, já existente no mercado, para comparar suas partes com as de seu próprio produto. Dessa forma, ao desconstruir um produto competidor, puderam

¹⁹ *Uknown unknowns*

²⁰ *Design Space*

revisar alguns detalhes de sua solução e resolver problemas de impermeabilização que não estavam conseguindo dirimir de um modo simples. A interação com a bota competidora permitiu aos projetistas adquirir conhecimentos sobre o espaço projetual de seu produto, ao entenderem sua relação com o que já havia no mercado. Também lhes trouxe entendimentos a respeito de soluções técnicas - ao aprenderem um modo diferente de resolver um problema técnico de fabricação - e sobre questões mercadológicas - ao poderem avaliar se aquela solução era compatível com produtos já comercializados.

No desenvolvimento de protótipos novos, mesmo o insucesso pode levar à aprendizagem sobre o problema em questão. Quando não funcionam do modo pretendido, podem ser desconstruídos, refeitos e consertados até que se chegue ao resultado esperado, solidificando conhecimentos técnicos sobre o assunto nesse andamento. Esse processo de prototipar uma ideia, avaliar e re-prototipar, de forma iterativa é comum em indústrias onde o custo de produzir um protótipo é relativamente baixo, principalmente comparado ao custo de produção final do produto em casos de fabricação em massa. Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler citam um exemplo onde essa prototipagem repetitiva ocorreu no desenvolvimento de uma placa de áudio eletrônica. Ao elaborar diversos protótipos funcionais para testar a placa, a engenheira responsável pelo projeto pôde aprender sobre as limitações de cada versão do projeto, as refinando gradativamente até chegar a uma solução plenamente adequada. Cada versão elaborada era uma manifestação física das ideias projetuais desenvolvidas de forma incremental. Como o custo de cada placa era pequeno em relação ao da produção final e a margem de erro aceitável muito baixa uma vez que o produto seria depois fabricado serialmente, o custo desse processo se justificou.

1.5.3 Informar a Tomada de Decisões

O terceiro papel da prototipagem é o de prover melhores informações, a partir das contribuições já feitas enquanto facilitadora da comunicação e auxiliadora da aprendizagem, para dar base à tomada de decisões. A ação decisória é central a qualquer processo projetual, pois permite aos projetistas avançarem entre marcos de desenvolvimento, cumprir prazos e eventualmente concluir o objetivo do processo. Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler identificam três categorias de decisões que são

tomadas com o auxílio de protótipos, aquelas sobre: a “desejabilidade”²¹ do produto; a viabilidade econômica²² dele; e, sua viabilidade técnica²³.

As decisões acerca da desejabilidade tratam de preferências e gostos pessoais dos membros da equipe projetista, dos usuários e clientes finais e de quaisquer outras partes interessadas. Na categoria da viabilidade econômica incluem-se todos os aspectos mercadológicos do produto, tais como custos de produção, estrutura da cadeia produtiva, modelo de negócio etc. Por fim, as decisões sobre a viabilidade técnica são aquelas referentes à execução e ao funcionamento efetivo do produto. Essas três categorias frequentemente se sobrepõem e, também, um só protótipo pode abordar todas as três de uma só vez.

Novamente, no exemplo do projeto da bota infantil esses papéis foram evidenciados. Em certo momento a equipe comparou os diversos protótipos gerados, avaliando o custo de produção de cada um e assim selecionaram o de melhor viabilidade econômica dentre eles. Em outro momento, efetuaram testes com usuários potenciais para garantir que podiam ser adequadamente seladas - avaliando-se assim um aspecto de sua viabilidade técnica - e, também, se as crianças gostavam do desenho delas - avaliando aspectos de sua desejabilidade.

Para os autores, protótipos podem auxiliar na tomada de pequenas decisões incrementais e diárias. Contudo, essas pequenas decisões também permitem a gradual revisão do projeto que leva a versões mais refinadas e completas. Essas versões, por sua vez, podem então servir de marcos no histórico de desenvolvimento dos projetos ou *milestones*, o mesmo conceito proposto por Ulrich e Eppinger.

Protótipos de *milestones* podem ser utilizados em reuniões de apresentação e entrega para a transição entre grandes etapas de projeto, concentrando em sua materialização o conjunto de decisões e esforços projetuais feitos até aquele momento. Auxiliam, portanto, na definição dos passos seguintes, apontando se a solução irá seguir na mesma direção, mudar para outra ou ser completamente cancelada. Permitem também a rastreabilidade do processo todo ao facilitar a localização de estados passados do projeto. Também servem para marcar objetivos

²¹ *Desirability*

²² *Viability*

²³ *Feasibility*

e prazos futuros que devem ser cumpridos pela equipe de projeto, ao serem colocados como metas de entrega.

Em conclusão, protótipos usados em reuniões de apresentação de etapas funcionam como *milestones* do projeto, enquanto aqueles usados em iterações corriqueiras do processo projetual são considerados ferramentas incrementais de decisão. Em ambos os casos atuam como embasamento para a tomada de decisões, momentos críticos ao desenvolvimento de projetos. Podem informar um ou mais tipo de decisão, sobre aspectos da viabilidade econômica ou técnica da solução ou então sobre sua desejabilidade enquanto produto.

1.6 Prototipagem rápida

Como afirmado anteriormente, a maior parte da literatura que surgiu nas buscas por estudos sobre a prototipagem na Construção Civil trata da "prototipagem rápida". Segundo Pupo, Celani e Duarte (2009, p.439-441), as expressões "**prototipagem rápida**" e "**manufatura rápida**" têm suas raízes nos campos da Engenharia Mecânica e Desenho Industrial. Essas técnicas vêm sendo introduzidas recentemente à arquitetura e estão se tornando cada vez mais comuns nessa área; contudo, os significados de determinadas palavras e expressões relacionadas a essas técnicas variam de um campo para outro. Defendem que o sucesso de implementação dessas tecnologias é posto em risco pela falta de clareza por parte da literatura especializada em relação aos termos empregados; e assim, há uma necessidade urgente de se estabelecer definições apropriadas para seu uso na arquitetura.

Propõem uma série de definições e categorizações para o que chamam de "**materialização digital**", termo global que contempla todas os "**métodos de produção automatizada**" de artefatos físicos a partir de modelos digitais. Primeiramente, fazem uma distinção entre **modelos** e **protótipos**.

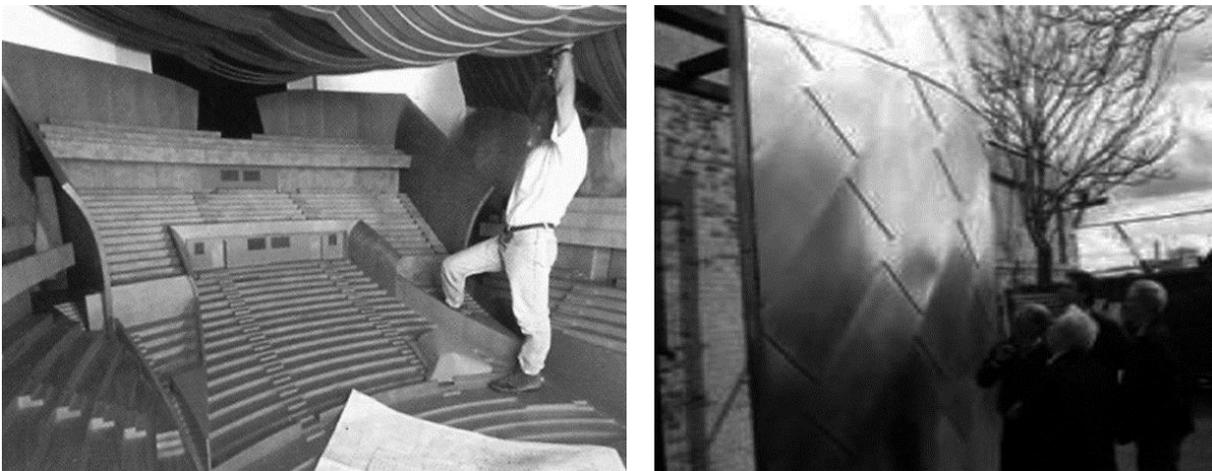
Para esses autores, modelos são representações esquemáticas, abstratas e simplificadas da realidade que demonstram apenas os elementos estritamente necessários para se entender determinado fenômeno que está sendo estudado. Como situações reais podem ser complexas demais para serem analisadas, os modelos podem ser entendidos como ferramentas que apoiam nosso processo cognitivo simplificando a realidade.

Modelos podem ser agrupados em três categorias: os **análogos**, **simbólicos**

e **icônicos** (MITCHELL, 1975 apud PUPO, CELANI e DUARTE, 2009). Modelos análogos são aqueles onde um conjunto de elementos é usado para representar o funcionamento de outros elementos em analogia, como ocorre com modelos estruturais onde seus componentes estão efetivamente sujeitos a esforços físicos, como ocorreria com os elementos a que representam. Modelos simbólicos representam a realidade através de símbolos, como palavras e números, e é o caso dos modelos matemáticos e das simulações computacionais. Já modelos icônicos são mais literais e geométricos; e incluem os desenhos técnicos e as maquetes em escala, típicos de projetos de arquitetura.

Protótipos, por sua vez, são um tipo específico de modelo, que normalmente são fabricados em escala real e para serem plenamente funcionais. Usualmente são construídos durante processos projetuais para prever como um produto irá se parecer e funcionar. Também são usados no planejamento do processo fabril.

Figura 16 – Protótipo em escala 1/10, para ensaios acústicos, e outro em escala real de um trecho de fachada – *Walt Disney Concert Hall* (2003) e Museu Guggenheim de Bilbao (1997).



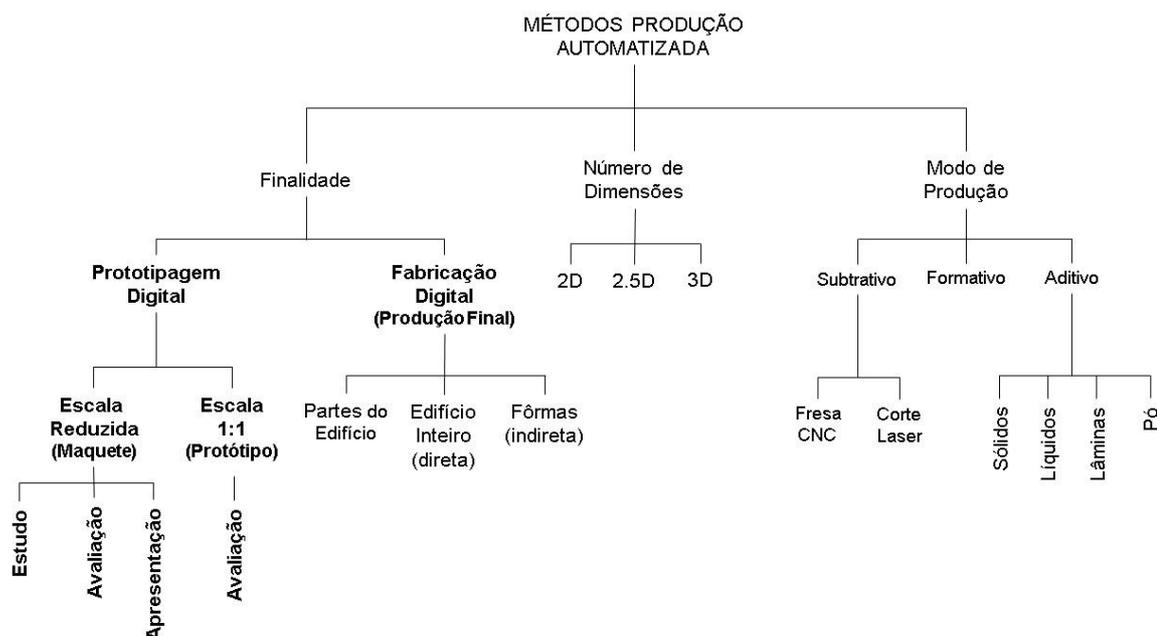
Fonte: PUPO, CELANI e DUARTE, 2009, p. 440

Para os autores, protótipos de construções em escala real são normalmente inviáveis. Contudo, podem ser feitos em escalas parciais, como o modelo 1/10 da Figura 16 (esquerda), utilizado para avaliar a acústica da Sala de Concertos Walt Disney, projeto de Frank Gehry. Na arquitetura os conceitos de “modelos em escala” - as maquetes - e “protótipos” se confundem e às vezes uma maquete pode ser considerada um protótipo.

Por outro lado, afirmam que protótipos em escala real podem ser empregados na arquitetura quando uma construção ou uma parte de uma construção será

reproduzida diversas vezes. Novamente demonstram um exemplo de um projeto de Frank Gehry, o Museu Guggenheim de Bilbao, para o qual foi construído um protótipo funcional e em escala real de um trecho de sua fachada (Figura 16, direita).

Gráfico 10 – Categorização dos Métodos de Produção Automatizada



Fonte: adaptado de PUPO, CELANI e DUARTE, 2009, p. 441

Segundo Celani e Pupo (2008, p. 32-35), o termo "prototipagem rápida" originalmente designava situações em que protótipos são produzidos por processos automatizados aditivos - aqueles em que materiais são depositados em camadas - também chamados de impressão 3D. Há ainda os processos automatizados subtrativos - aqueles em que um bloco de material é desbastado seletivamente - e os formativos - onde materiais são moldados, dobrados, encurvados etc. Apesar de, à princípio, abarcar apenas o emprego da impressão 3D, atualmente outros processos automatizados, tais como a fresagem CNC (Controle Numérico Computadorizado) e o corte a laser, têm sido contemplados pela expressão "prototipagem rápida".

A partir desses conceitos gerais, Pupo, Celani e Duarte propõem que os métodos de produção automatizada de peças modeladas digitalmente podem ser categorizados segundo três características principais: sua finalidade, o número de eixos com que as máquinas empregadas trabalham, e ainda segundo a maneira como produzem os objetos (Gráfico 10).

No que se refere à sua finalidade, os métodos de produção automatizada podem ser destinados à produção de protótipos – a prototipagem rápida - ou à manufatura rápida - a produção de produtos finais, como elementos construtivos empregados diretamente em uma construção. A **manufatura rápida**, portanto, é um conceito similar à **prototipagem rápida**; os mesmos métodos fabris são empregados, porém para a fabricação de componentes finais de um produto (após o processo projetual) ao invés de no desenvolvimento de protótipos (durante o projeto). Suas aplicações na construção podem ser variadas, desde a produção de fôrmas especiais para a concretagem de geometrias atípicas, até a produção de ornamentos esculpidos em pedra utilizados em obras de restauro, por exemplo.

Em conclusão, ambas empregam as mesmas tecnologias, mas para fins diferentes. Apesar disso, não é incomum esses termos serem confundidos e processos de “manufatura” serem chamados de “prototipagem” e vice-versa. Ademais, muitos trabalhos que abordam a “prototipagem rápida” tratam, em realidade, do emprego de métodos de produção automatizada na fabricação de maquetes, que como foi apontado por Pupo, Celani e Duarte, comumente se confundem com os protótipos, que, por sua vez, são um tipo específico de modelos. Por fim, outras tantas pesquisas focam nas tecnologias de produção automatizada em si, e não nas suas aplicações, seja na fabricação de modelos, protótipos ou produtos finais. Como o interesse de pesquisa da presente dissertação é sobre o uso de protótipos, de um modo geral, e não necessariamente em tecnologias de fabricação específicas, a contribuição da maior parte dessas publicações é limitada.

2 REPRESENTAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Após o processo de revisão da teoria acerca da prototipagem, que, como foi afirmado antes, se desenvolve hoje em áreas de conhecimento exógenas, partiu-se para a aplicação das conceituações levantadas enquadrando-as sobre a Construção Civil e suas ferramentas projetuais. Neste capítulo, será feita uma análise, sob essa ótica, das representações de projeto tipicamente utilizadas na Construção e no próximo será feita uma discussão a respeito de instrumentos atípicos: os protótipos de alta-fidelidade.

Apesar da variedade de classificações que os diversos autores estudados apresentam, um aspecto comum a todos é que propõem definições extremamente abrangentes para a prototipagem:

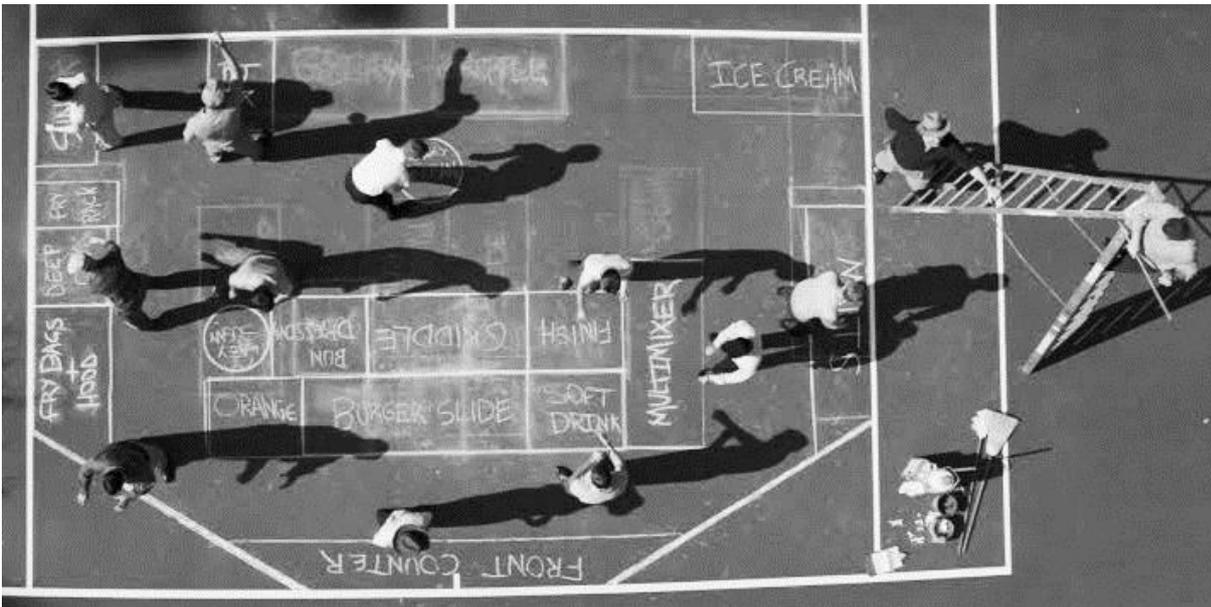
Definimos como protótipo **qualquer representação de uma ideia projetual**, independentemente de seu veículo. (HOUDE, HILL, 1997, p369. Tradução e grifo nosso.)

Se usarmos definições como essa de Houde e Hill, passamos a entender como “protótipos” diversos objetos, e mesmo fenômenos que certamente não estariam de acordo com o senso comum vigente de profissionais e acadêmicos da Construção. Por um lado, a radicalidade dessa postura é interessante porque contribui para institucionalizar técnicas muito úteis ao repertório projetual, mas que normalmente não são consideradas no rol das ferramentas de projeto oficiais. Por outro lado, a genericidade desses postulados também pode gerar confusões e falhas de comunicação uma vez que a Construção Civil - uma disciplina com milhares de anos de existência - possui muitas definições e conceitos já firmemente estabelecidos que se aplicam sobre os mesmos objetos que agora são abordados por essas outras disciplinas.

Na Figura 17, a seguir, é apresentada uma cena do filme estadunidense “The Founder” (EUA, 2016) que aborda o surgimento e a expansão da cadeia de *fast food* *McDonald’s*. Na cena em questão, os irmãos fundadores da empresa descrevem como desenvolveram o sistema de logística inovador do restaurante, batizado de “speedee service system”. Para chegar a uma configuração ótima para a sua cozinha industrial desenharam e redesenharam uma série de *layouts* no chão de uma quadra de tênis enquanto colocavam os funcionários dela para emular os movimentos que

executavam em suas atribuições. Assim podiam avaliar cada *layout* proposto em como afetava as operações dos funcionários e a cada constatação que havia alguma limitação no projeto, podiam reelaborá-lo rapidamente, redesenhando-o no chão da quadra. Através desse processo puderam revisar inúmeras vezes o desenho da cozinha de uma forma ágil e pouco custosa. Apropriando-nos das ideias de Lim, Stolerman e Tenenberg, poderíamos afirmar que a planta/quadra-de-tênis dos irmãos McDonald, e a dinâmica que realizaram com seus funcionários, configuravam um “protótipo” que “filtra” determinados aspectos relevantes do projeto de uma cozinha industrial, assim permitindo sua rápida revisão iterativa. De forma semelhante, segundo Ulrich e Eppinger, esse exemplo poderia ser classificado como um “protótipo focado”, uma vez que se debruça sobre um aspecto específico do projeto, misturando elementos “físicos” - os movimentos dos funcionários - com elementos “abstratos” - os *layouts* desenhados no chão - do problema em questão.

Figura 17 – A invenção do *speedee service system* dos irmãos McDonald: “protótipo focado” ou “protótipo / filtro” para o design de uma cozinha industrial e sua logística de operação



Fonte: THE FOUNDER, 2016.

De qualquer modo, esse exemplo evidencia a contribuição positiva que essas definições vagas podem ter para a discussão. Nas disciplinas da Construção, dificilmente se consideraria algo dessa natureza como uma ferramenta projetual do mesmo modo como o são os produtos tradicionais do desenho técnico. Contudo, sua relevância enquanto tal e a contribuição para o processo desse projeto específico são evidentes.

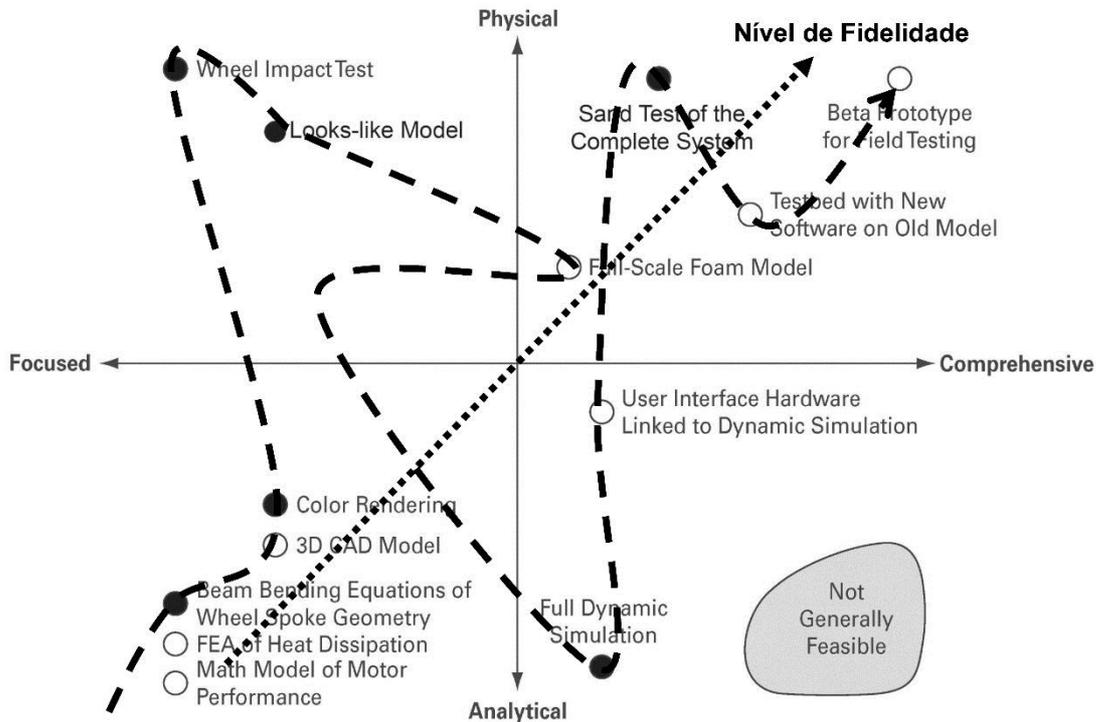
Ao mesmo tempo, chamar de “protótipo” toda e qualquer representação de um projeto, como propõem Houde e Hill, pode levar a graves erros de comunicação na Construção, pelo simples fato de já haver consensos de nomenclatura há muito estabelecidos. Na Figura 3 da presente dissertação (página 44), por exemplo, é exibido um “protótipo-de-papel”, ferramenta tipicamente usada no desenvolvimento de interfaces gráficas de aplicativos de celulares e *tablets*. Nas práticas usuais de projeto na Construção esse tipo de artefato seria simplesmente chamado de “desenho” ou no máximo de “maquete de papel”. Chamá-lo de “protótipo” provavelmente causaria estranheza à maioria dos profissionais do meio. O sentido que essa palavra normalmente assume no senso comum de construtores aproxima-se muito mais do que a literatura especializada designaria de “protótipo de alta-fidelidade”.

O nível de fidelidade, por sua vez, é um conceito que surge repetidamente na bibliografia estudada, e mesmo quando não é citado diretamente, pode ser percebido implicitamente nas teorias propostas. Através dele se define o quão próximo uma representação está do objeto final sendo representado, em todos seus aspectos. Um protótipo absolutamente “fiel” é efetivamente uma cópia exata de um produto; ou seja, equivalente ao “protótipo beta” de Ulrich e Eppinger ou o “protótipo funcional” de Chartier e Badev. Já uma descrição verbal de uma ideia ou um esboço desprezioso em uma folha de rascunho seriam catalogados como “protótipos de baixa fidelidade” e entre esses extremos, logicamente, existem variados graus de fidelidade e de classificação.

Como o objetivo com esta dissertação é trazer para a Construção Civil bases teóricas de outros campos, mas adaptando-as, **escolheu-se utilizar o termo “representações” ao invés de “protótipos”** para designar as manifestações de ideias projetuais de baixa ou média fidelidade. **São chamadas de “protótipos” apenas as representações de alta fidelidade.**

Ulrich e Eppinger propõem que, ao longo do desenvolvimento de projetos em geral, usa-se um amplo espectro de protótipos e que esses podem ser classificados de variadas formas, segundo um modelo de duas dimensões, ou eixos. Projetistas assim o fazem porque ora precisam verificar um aspecto do projeto, ora outro; e nesse processo lançam mão dos instrumentos disponíveis que lhes permitem fazê-lo da forma mais rápida e eficiente o possível. Isso evidentemente não se dá de forma linear ou totalmente previsível; pelo contrário, caminha de modo errante. Contudo, a tendência ao longo do desenvolvimento de um projeto é que os protótipos empregados vão gradativamente adquirindo maior fidelidade

Gráfico 11 – Nível de Fidelidade e a progressão de projetos na classificação de Ulrich e Eppinger



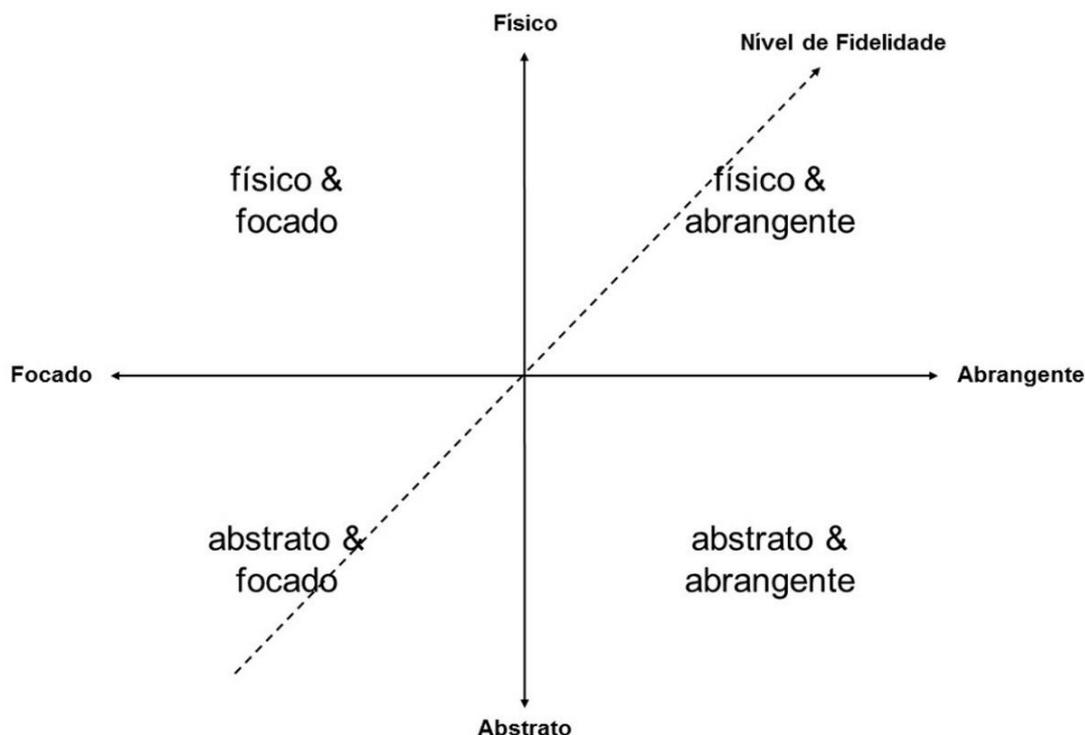
Fonte: adaptado de ULRICH, EPPINGER, 2012, p.294

Esse caminho da fidelidade crescente se expressa claramente no modelo de Ulrich e Eppinger através de um vetor ascendente. Portanto propõe-se que existe um terceiro eixo desse modelo, que seria plotado através uma diagonal que secciona os quadrantes inferior esquerdo e superior direito (Gráfico 11).

Ainda poderíamos afirmar que, no caso de produtos físicos como os da Construção Civil, os protótipos se classificam, de modo geral, em uma de quatro grandes categorias, que correspondem aos quadrantes do Gráfico 12. Cada um desses quadrantes será usado na classificação geral das ferramentas projetuais na Construção Civil e discutidos no restante deste capítulo, assim como no próximo. No presente capítulo será feito um exercício de análise, sob a ótica da teoria da prototipagem estudada, das ferramentas usuais da Construção Civil, que correspondem aos três quadrantes de menor nível de fidelidade. No próximo, será abordado o último quadrante, “físico & abrangente”, que corresponde aos protótipos de alta fidelidade: as ferramentas inusuais à Construção.

Por se entender que o modelo de Ulrich e Eppinger, consegue sintetizar de uma forma simples e clara muitos conceitos também abordados pelos outros autores, optou-se por utilizá-lo como arcabouço base da presente discussão. Contudo, ideias específicas dos outros autores serão também trazidas à tona conforme se mostrarem relevantes.

Gráfico 12 – Quadrantes de classificação geral de representações



Fonte: elaboração própria a partir do modelo de ULRICH, EPPINGER, 2012, p.294

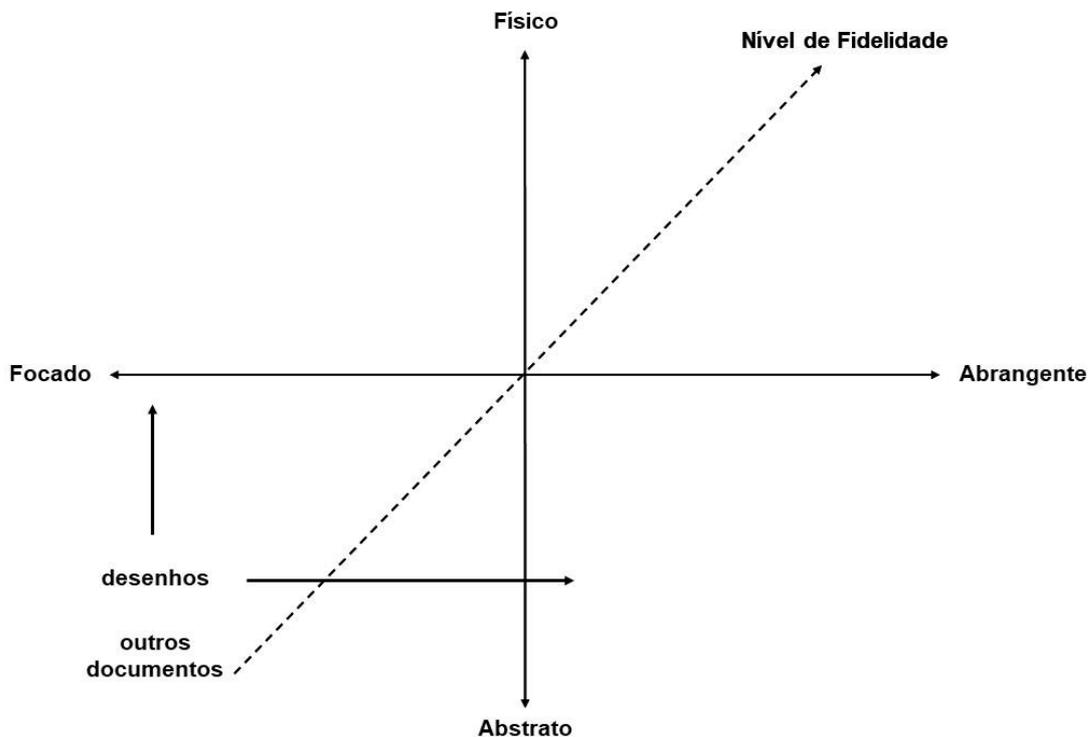
2.1 Representações abstratas e focadas – gráficas e simbólicas

Quando falamos de ferramentas projetuais na Construção Civil normalmente a primeira coisa que vem à mente são os desenhos; as ditas “plantas”. Tradicionalmente a representação gráfica é o modo com que a humanidade sempre projetou suas construções. O peso e a importância dela é tão grande que não é incomum haver desentendimentos sobre qual a função de fato dos projetistas, sendo frequentemente creditado a eles apenas a produção de desenhos. A própria palavra “desenho” normalmente pode assumir o mesmo significado de “projeto”.

A forma, a função e o nível de detalhamento dessas representações variam enormemente, contudo todas elas, segundo as definições aqui adotadas, seriam “representações abstratas” e mais ou menos “focadas”. Uma vez que representam objetos físicos – construções -, mas elas mesmos não o são, são abstratas. Uma vez que não conseguem representar a completude de uma construção, mas apenas determinados aspectos, são focadas. Contudo, podem transitar por pontos ligeiramente diferentes do gráfico ao longo dessas duas dimensões (Gráfico 13).

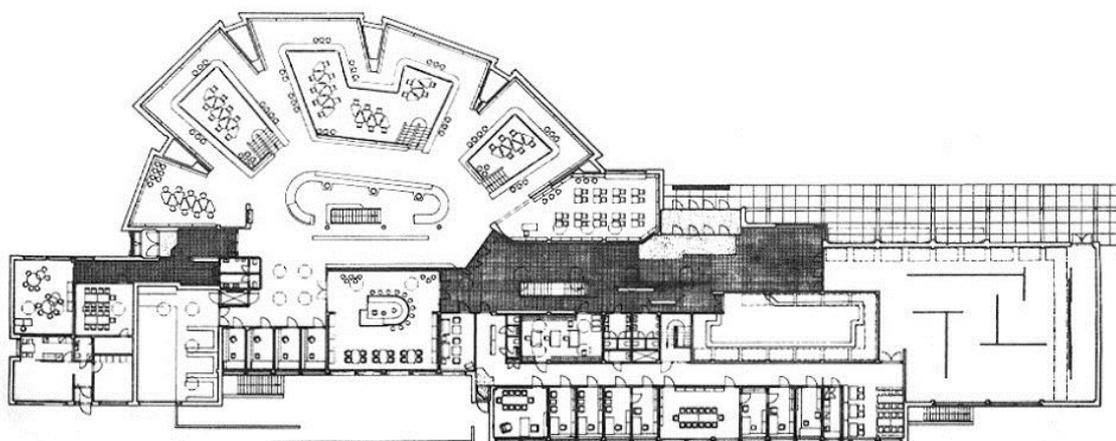
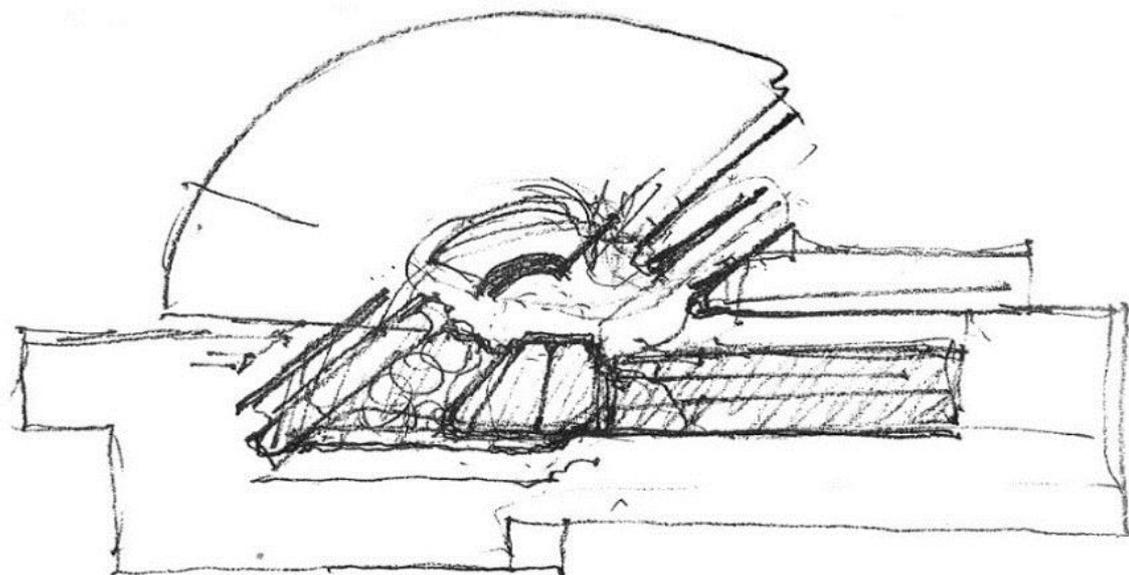
Ao longo do eixo focado/abrangente, desenhos podem apresentar diversas qualidades. Podem representar apenas aspectos muito específicos, ou focados, do problema em questão, como normalmente é o caso de *croquis* e detalhes. Mas também podem retratar diversos sistemas da construção de uma só vez - *layout*, estrutura, partições, instalações prediais, fluxos etc. - como no caso das plantas desenvolvidas no final de um projeto (Figura 18). Nas etapas imediatamente anteriores à obra, busca-se dirimir o máximo possível de erros e conflitos de um projeto, necessitando-se assim desenhos mais abrangentes. Contudo, por mais detalhadas que essas representações possam ser, elas nunca conseguem representar a totalidade de uma construção - todos os inúmeros conflitos de seus diversos sistemas e da execução e utilização futura deles, a sensação de ser um usuário dos espaços etc. Assim, desenhos podem ser mais ou menos abrangentes, mas de um modo geral se encontram no lado focado da classificação.

Gráfico 13 – Representações abstratas e focadas: as ferramentas mais usuais da Construção Civil



Fonte: elaboração própria

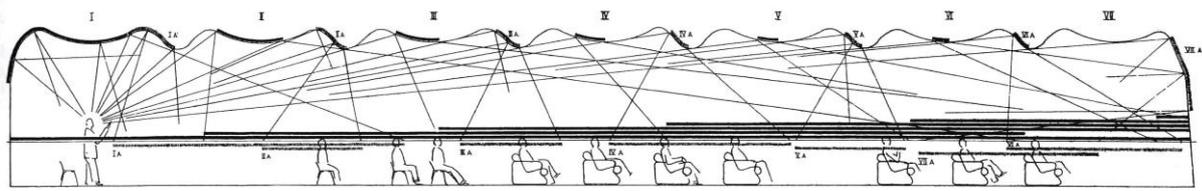
Figura 18 – Croquis e Planta-Baixa - Biblioteca de Rovaniemi (Alvar Aalto, 1963)



Fonte: FLEIG, 1995, v. II, p. 130 e 132

De forma semelhante, no eixo abstrato/físico, representações gráficas definitivamente não podem ser categorizadas como físicas, uma vez que são simbologias gravadas em papel que procuram refletir uma existência concreta posterior. Contudo, podem sim buscar retratar aspectos da “fiscalidade” dessa existência posterior em desenhos analíticos, como nos exemplos das seguintes figuras.

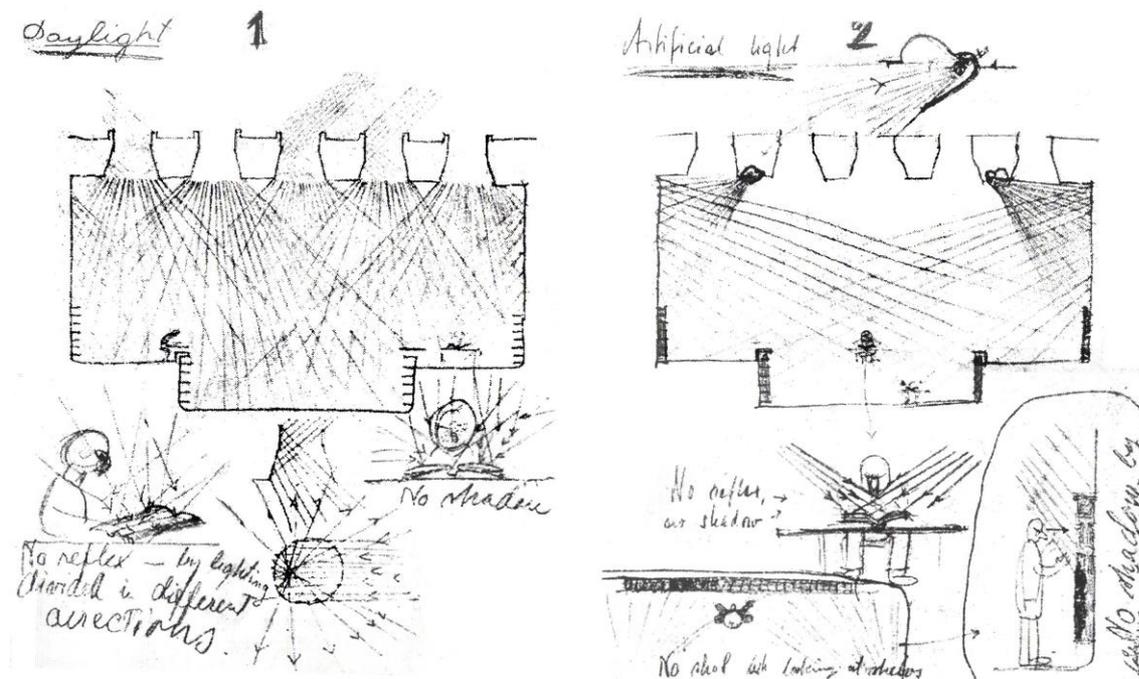
Figura 19 – Diagrama Acústico - Auditório da Biblioteca de Viipuri (Alvar Aalto, 1927-1935)



Fonte: FLEIG, 1995, v. I, p. 55

Na Figura 19, vê-se um corte de um auditório, projetado pelo arquiteto finlandês Alvar Aalto, com o qual foi feito um estudo da acústica do ambiente. Nele, os percursos dos sons emanados por um palestrante são representados por linhas que se rebatem contra um forro acústico, cuja geometria buscava redirecionar a voz para os ouvintes (FLEIG, 1995, v. I, p. 55). O segundo exemplo (Figura 20), do mesmo autor, demonstra o comportamento das luzes naturais e artificiais no salão de uma biblioteca também através de vetores e seus rebatimentos pelas paredes e outros obstáculos do ambiente (FLEIG, 1995, v. I, p. 49).

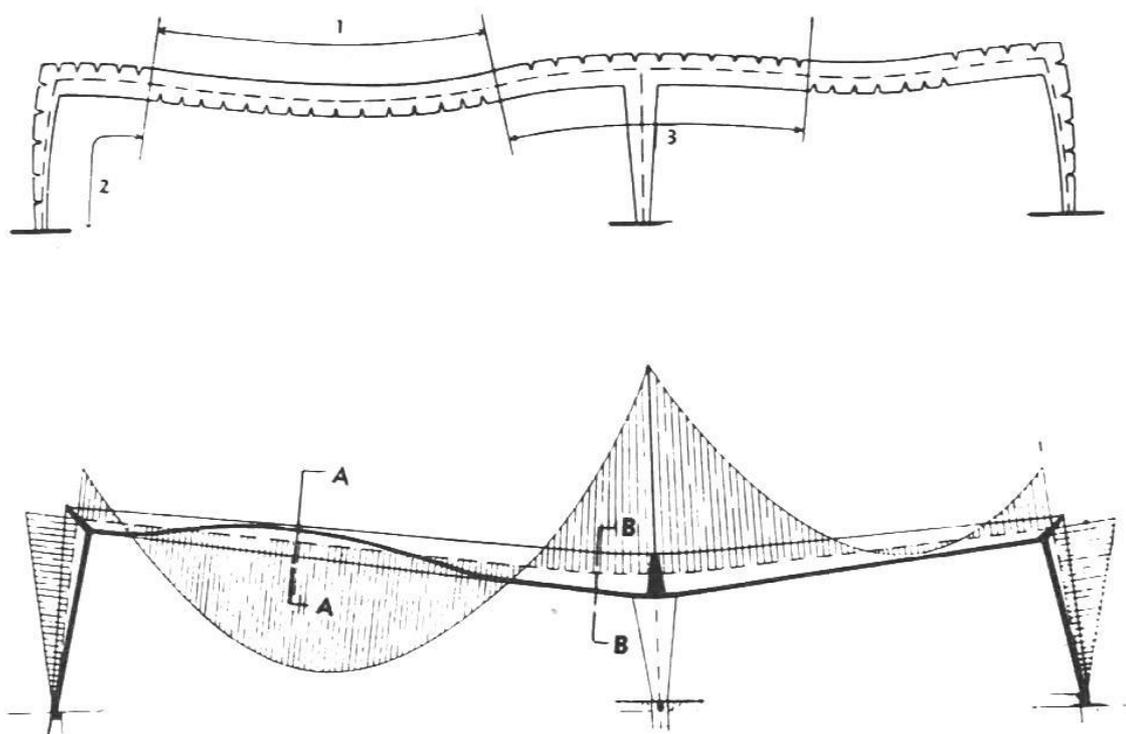
Figura 20 – Diagramas de iluminação - Biblioteca de Viipuri (Alvar Aalto, 1927-35)



Fonte: FLEIG, 1995, v. I, p. 49

Por fim, na Figura 21, o engenheiro italiano Pier Luigi Nervi fez uso de um diagrama de momento fletor, instrumento típico do cálculo estrutural, que sintetiza graficamente os esforços que se incidem sobre as vigas de uma cobertura obtidos por uma série de cálculos matemáticos (DESIDERI, NERVI JR, POSITANO, 1982, p. 63-70).

Figura 21 – Diagrama estrutural – Auditório da Sede da UNESCO (Pier Luigi Nervi, 1953-58)

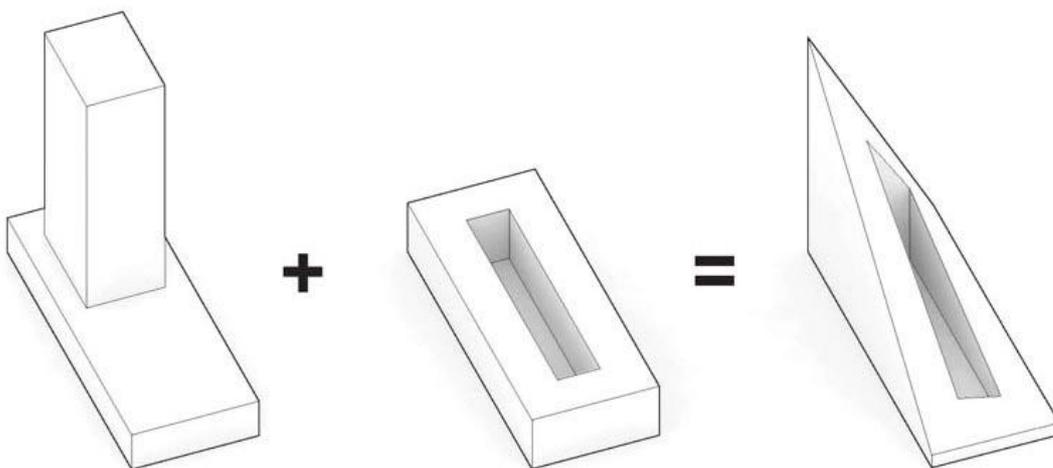


Fonte: DESIDERI, NERVI JR, POSITANO, 1982, p. 70

Em todos os casos, os projetistas puderam representar, com mais ou menos precisão, o comportamento de fenômenos físicos reais – o som, a luz e esforços mecânicos – através de “simulações” gráficas. Para tal, porém, é necessária a articulação entre o desenho geométrico e a previsão racional de fenômenos físicos, cujo sucesso está sujeito ao nível de conhecimento que o desenhista/projetista tem sobre ambos, assim como sua experiência prévia com situações semelhantes. Desenhos podem ter uma maior fisicalidade ou abrangência, contudo irão sempre esbarrar em um limite pelo simples fato de não serem de fato físicos, apesar de retratarem objetos que o são. Sempre serão apenas representações abstratas e relativamente simples de um mundo real mais complexo.

Ademais, representações gráficas podem também variar em sua função, ou como afirmariam Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler, seus papéis. Os dois desenhos da Figura 18 representam o mesmo pavimento da mesma edificação. Contudo, a diferença visual entre eles exemplifica uma disparidade que existe entre os papéis que desempenham. Essas plantas têm níveis de detalhamento e precisão de traços bastante diferentes porque foram empregados em momentos completamente distintos do projeto. Croquis são geralmente utilizados para explorar um problema ou uma solução e normalmente são elaborados logo no início de um projeto, ou então em momentos exploratórios pontuais de etapas posteriores. Frequentemente são compreensíveis apenas para quem os desenha, pois não são destinadas à comunicação com terceiros. São apenas manifestações da reflexão interna de um projetista. Já desenhos técnicos mais apurados normalmente servem sim ao propósito de comunicar uma solução já desenvolvida para um grande número de pessoas e por isso exigem maior rigor, e normatização, em sua elaboração.

Figura 22 – Diagrama de composição formal – VIA 57 West (Bjarke Ingels Group, 2010-2016)



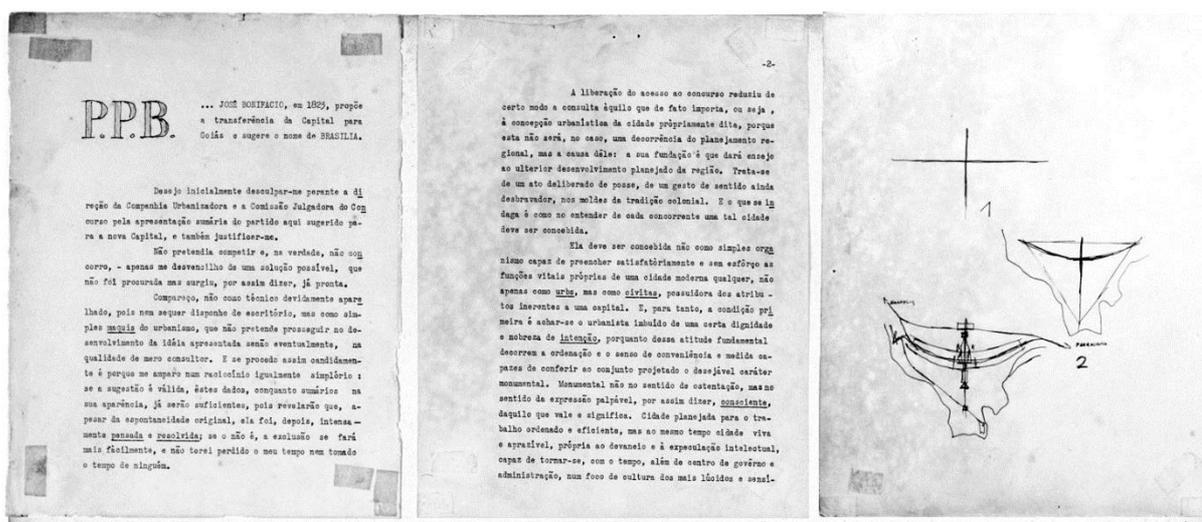
Fonte: *Bjarke Ingels Group*

O nível de detalhe de um desenho é uma característica comumente manipulada por desenhistas em função dos seus propósitos. Mesmo em ilustrações não tão despretensiosas como a da Figura 18, projetistas podem criar representações deliberadamente abstratas. Na Figura 22, por exemplo, os arquitetos desenvolveram

um diagrama altamente abstraído - uma “equação de formas geométricas” - para elucidar a racionalidade por trás de uma composição formal. Mesmo que um projeto se encontre em um nível de definição já bastante avançado, é comum se empregar desenhos simplificados e abstratos para facilitar a comunicação e o entendimento dele. De acordo com Lim, Stolerman, e Tenenberg, ao focar em aspectos essenciais essa representação estaria “filtrando” o projeto, para abordar apenas aquilo que é necessário naquele momento.

Existem também outros tipos de representações abstratas e focadas que representam ideias projetuais, mas não o fazem de uma forma literal, ou mesmo aproximadamente literal. Há diversas formas de manifestar ideias projetuais de modos ainda mais abstraídos do que por desenhos; exemplos incluem textos, tabelas, e diagramas não-espaciais.

Figura 23 – Páginas do Memorial do Concurso de Brasília (Lúcio Costa, 1956)



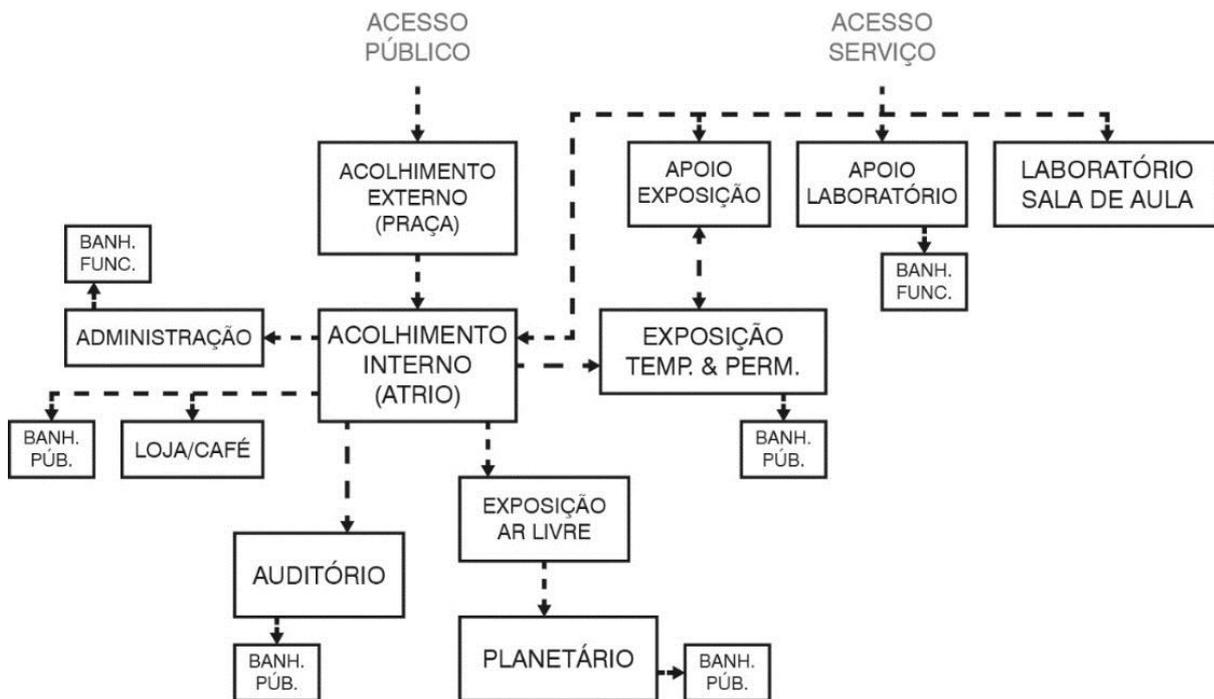
Fonte: Instituto Antônio Carlos Jobim – Acervo Lucio Costa.

Ideias acerca de uma construção futura também podem ser comunicadas e registradas de forma textual. Um exemplo notório é a proposta do arquiteto urbanista Lucio Costa para o concurso que visava selecionar o Plano Piloto de Brasília (Figura 23). A sua candidatura vencedora foi elaborada de última hora e à diferença das dos seus concorrentes incluía relativamente poucos desenhos. O principal meio de comunicação de suas ideias foi através de textos onde descrevia a cidade futura, associado a desenhos esquemáticos (COSTA, 1997, p.283-297).

Há ainda os desenhos e diagramas que representam objetos abstratos e não literais, diferente de uma planta ou perspectiva. Exemplos comuns são os

organogramas e fluxogramas, como o da Figura 24 que demonstra graficamente a organização de uma série de ambientes de um edifício. Esse tipo de desenho retrata as ligações entre espaços, evidenciando a estrutura lógica que existe por trás de uma planta-baixa, mas sem representar as suas qualidades geométricas reais. Trata-se de um tipo de desenho ainda mais abstrato do que os *croquis*.

Figura 24 – Fluxograma de ambientes – Museu de Ciências (Caminha, Enoque e Thurler, 2010)



Fonte: elaboração própria

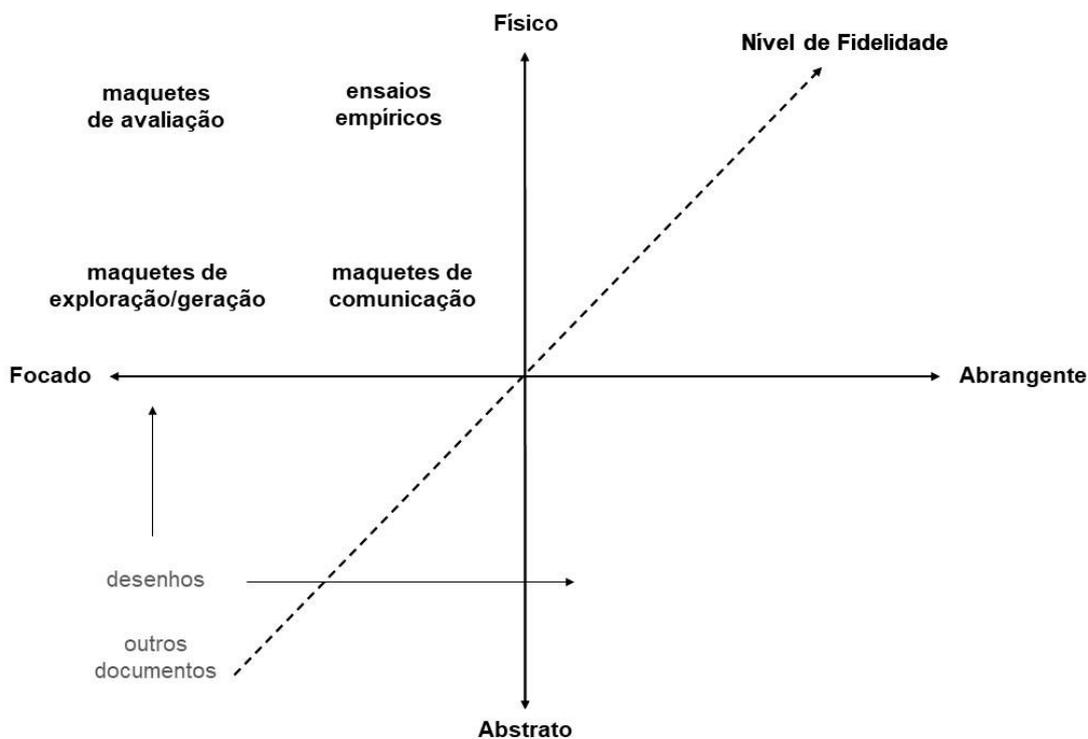
Semelhantemente, há gráficos que buscam representar ações e acontecimentos que se dão ao longo do tempo. O Gráfico de Gantt é muito utilizado na Construção para o planejamento de processos de projeto ou de obras. Como ele é possível representar graficamente a sequência cronológica de tarefas, suas inter-relações e o tempo de suas durações; facilitando a visualização de processos complexos (Gráfico 14).

Esses últimos exemplos não são bem desenhos técnicos, mas sim representações gráficas de outra natureza. Emulam aspectos intangíveis, porém relevantes, de um projeto. De qualquer forma, os desenhos, literais ou não, e os textos são as representações mais comuns na Construção. Porém por serem representações abstratas, sempre serão limitadas na sua fidelidade ao objeto projetado - a construção – uma vez que esse é de natureza física.

Podemos categorizar as maquetes em função do modo em que são usados em processos projetuais. De acordo com Nigel Cross (2000, p. 30), qualquer processo de *design*, ou de projeção, passa por quatro etapas fundamentais: exploração, geração, avaliação e comunicação (Gráfico 15). Para ele, todo projeto começa com a exploração do problema em questão, seguido pela geração de soluções possíveis. Depois ocorre a avaliação das soluções propostas, o que pode levar à revisão ou reelaboração dessas, em um ciclo de geração/avaliação que pode se repetir inúmeras vezes. Por fim, após a escolha por uma determinada solução, segue-se o trabalho de comunicá-la para diversos atores, dentre eles potenciais usuários e os responsáveis pela execução final dos produtos.

A partir desse modelo simplificado do processo projetual poderíamos afirmar que existem três tipos básicos de maquetes: de exploração/geração, de avaliação e de comunicação (Gráfico 16).

Gráfico 16 – Maquetes e ensaios: as representações físicas mais comuns na Construção Civil

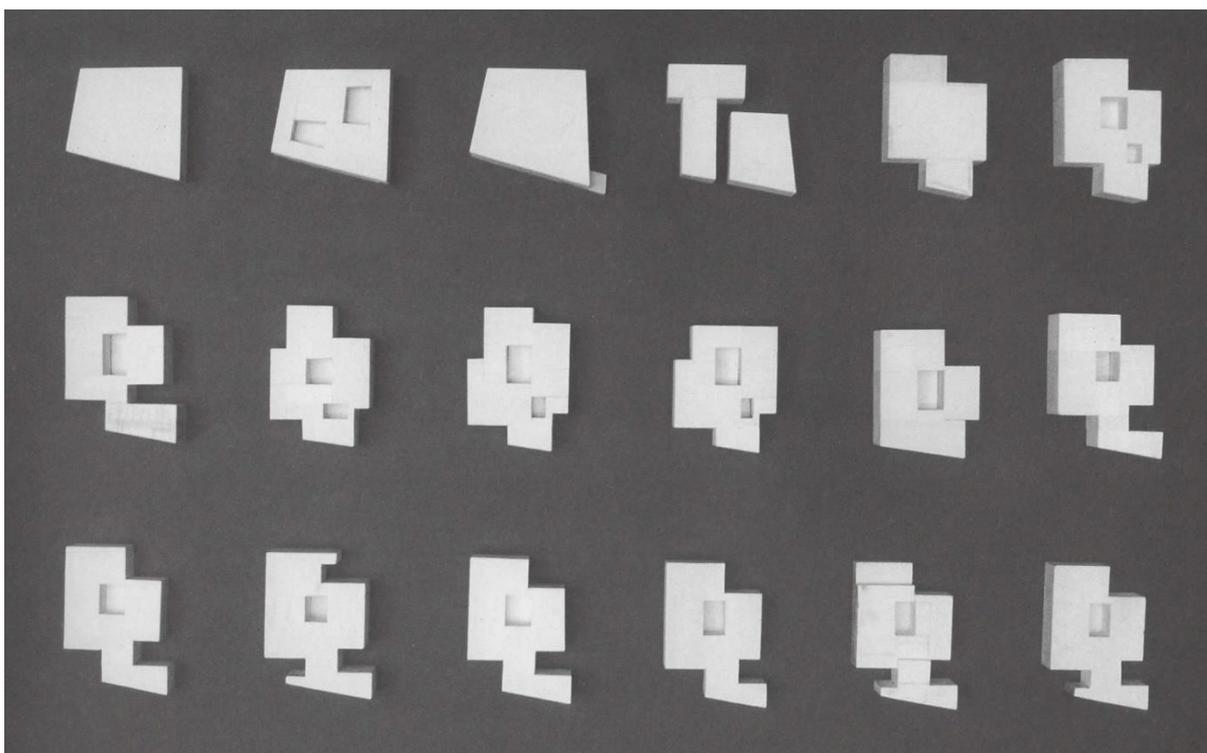


Fonte: elaboração própria.

As maquetes de exploração/geração são aquelas usadas para explorar um problema e gerar possíveis soluções para ele. Normalmente se desenvolve esse tipo de modelo no início de um processo projetual, de um modo semelhante aos *croquis*,

para a concepção de ideias. Diversos autores (CROSS, 2000, p.9-11, 2006, p. 80; DORST, CROSS, 2001; SCHÖN, 1983, p. 49-69; RITTEL, 1988; RITTEL, WEBBER, 1973) defendem que uma ação típica de projetistas é que buscam entender a natureza de um problema abordado através das próprias soluções que propõem. Ao gerar soluções, avaliá-las e conseqüentemente revisá-las em um ciclo repetitivo podem gradativamente adquirir um maior entendimento da situação abordada. A principal característica das maquetes de exploração/geração é a de facilitar esse processo de proposição iterativo, auxiliando projetistas na busca por compreender melhor um determinado problema projetual. Esse tipo de representação, portanto, assume o papel de “auxiliar a aprendizagem”, como proposto por Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler (2018, p. 8).

Figura 25 – Maquetes de exploração/geração de formas - Instituto de Farmacêuticos Hospitalares (Herzog & de Meuron, 1995-98)



Fonte: MACK, 2005, p. 145

Em função da agilidade desse processo e do descompromisso com ideias transitórias, modelos desenvolvidos nessa etapa tendem a ser expeditos e de acabamento bruto. Uma vez que normalmente são utilizados apenas em processos internos às equipes de projeto e não necessariamente para demonstrações com clientes ou entidades externas, não precisam ter aparência aprimorada.

Tal qual o “protótipo de estudo da forma”, de Chartier e Badev, na arquitetura comumente usam-se “maquetes de estudo da forma”. São aquelas que buscam definir e aprimorar a geometria de uma solução (Figura 25). De forma análoga, há maquetes de “estudo de materialidade” que procuram emular a aparência de um projeto; de forma semelhante ao “protótipo visual” de Chartier e Badev; porém para fins de concepção de projeto e não para a apresentação (Figura 26). Em ambos os casos, essas representações atuam como filtros (LIM, STOLERMAN, TENENMBERG), que evidenciam determinados aspectos do projeto que são relevantes àquela etapa de desenvolvimento, facilitando a manipulação desses pelos projetistas.

Figura 26 – Maquete de estudo de materialidade - Casa de Madeira (Herzog & de Meuron, 1995)



Fonte: MACK, 2005, p. 164

Há duas claras vantagens no emprego de maquetes para a exploração/geração projetual ao invés de desenhos. Apesar de esses últimos evidentemente consumirem menos tempo e recursos em sua elaboração, as maquetes são mais “fiéis” à construção real e são mais inteligíveis para diversos atores. Por se tratar de objetos físicos, as maquetes são compreendidas pelas pessoas de uma forma mais próxima à construção concreta. Com isso requerem menor capacidade de abstração e permitem uma percepção mais fluída da solução proposta. Segundo as ideias de Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler (2018, p. 5) esse aspecto as torna facilitadoras para a comunicação, oferecendo uma base comum para discussões e mediações.

Maquetes despreziosas e flexíveis de exploração/geração são extremamente úteis em situações onde as definições de uma solução precisam ser

negociadas por várias partes simultaneamente. A Figura 27 ilustra um desses cenários, tirados da experiência profissional do próprio autor desta dissertação: uma reunião para discutir a implantação de um conjunto de habitação social com arquitetos, assistentes sociais e um grupo de futuros moradores. Foi feita uma dinâmica em que os moradores montaram, com a mediação dos técnicos, possíveis implantações para o conjunto através da manipulação de diversos blocos e objetos. Esses objetos foram previamente desenvolvidos pelos arquitetos para emularem pequenos espaços públicos, vegetações, áreas comerciais e as próprias habitações. Essas últimas eram representadas por pequenos blocos simples de madeira, mas cujas volumetrias haviam sido previamente estudadas e definidas segundo uma série de determinações da Caixa Econômica Federal – entidade financiadora da obra – além de outras considerações técnicas – estruturais, construtivas, ergonômicas e de conforto ambiental.

Figura 27 – Maquetes colaborativas de exploração/geração - Conjunto MCMV Nova Esperança (Arché Projetos, 2016)



Fonte: Dinho Moreira / Arché Projetos / Fundação Bento Rubião

Ao predefinir algumas peças do vocabulário de soluções possíveis, os arquitetos estavam filtrando os problemas que seriam considerados naquela discussão. Em uma reunião com tantos atores de variadas formações e níveis de

conhecimento técnicos, esse mecanismo permitiu a simplificação das conversas, evitando que o foco da dinâmica se perdesse em ponderações sobre detalhes não relevantes naquele momento. Ao mesmo tempo, a configuração aberta e flexível, porém modularizada, da atividade permitiu que os moradores - os principais interessados e afetados pelas consequências das decisões tomadas naquele momento – pudessem expressar suas inquietações e preferências, mesmo sem dominarem técnicas complexas de desenho, modelagem ou de construção de edifícios. As maquetes manifestaram as ideias projetuais dos moradores ao mesmo tempo que filtraram aspectos relevantes do projeto (LIM, STOLERMAN, TENENBERG). Ao mesmo tempo esses objetos físicos permitiram que os agentes interessados pudessem conversar ao seu redor, expondo as suas ideias de uma forma clara (LAUFF, KOTYS-SCHWARTZ, RENTSCHLER).

Já as maquetes de comunicação são a imagem tradicional dos modelos arquitetônicos. Equivalente ao “protótipo visual” de Chartier e Badev, esse gênero serve principalmente para comunicar a terceiros as intenções e ideias por trás de um projeto. Normalmente são mais bem-acabadas e construídas que as maquetes de exploração/geração, frequentemente simulando cores, texturas e materiais da construção pretendida, de maneira mais fiel. São os modelos usados para a divulgação de novas construções, em peças publicitárias, em propostas de concursos de projeto, enfim, em situações onde é necessária alguma ação persuasiva. O principal mecanismo envolvido é a criação de uma imagem mental clara e sedutora na mente das pessoas, contribuindo para avaliar a “desejabilidade” de uma solução e para persuadir clientes, e outros atores, a aceitar aquela proposta (LAUFF, KOTYS-SCHWARTZ, RENTSCHLER, 2018, p. 8).

Esse tipo de maquete tende a ter uma aparência visual mais fiel à construção pretendida, contudo às vezes certas características, como as cores, são propositadamente abstraídas. De qualquer forma, por mais fiel que sejam visualmente, na prática não o são em termos físicos e construtivos. Mesmo maquetes excepcionalmente detalhadas, como a da Figura 28, não são fiéis às técnicas construtivas efetivamente usadas na construção, logo suas características materiais também não o são. Ademais, a forma com que o mundo à volta – os indivíduos, a sociedade, o meio ambiente, a paisagem, as intempéries, o tempo etc. - interagem com elas é fundamentalmente diferente, pelo simples fato de serem modelos em escala. Até existem maquetes de comunicação que buscam representar projetos em

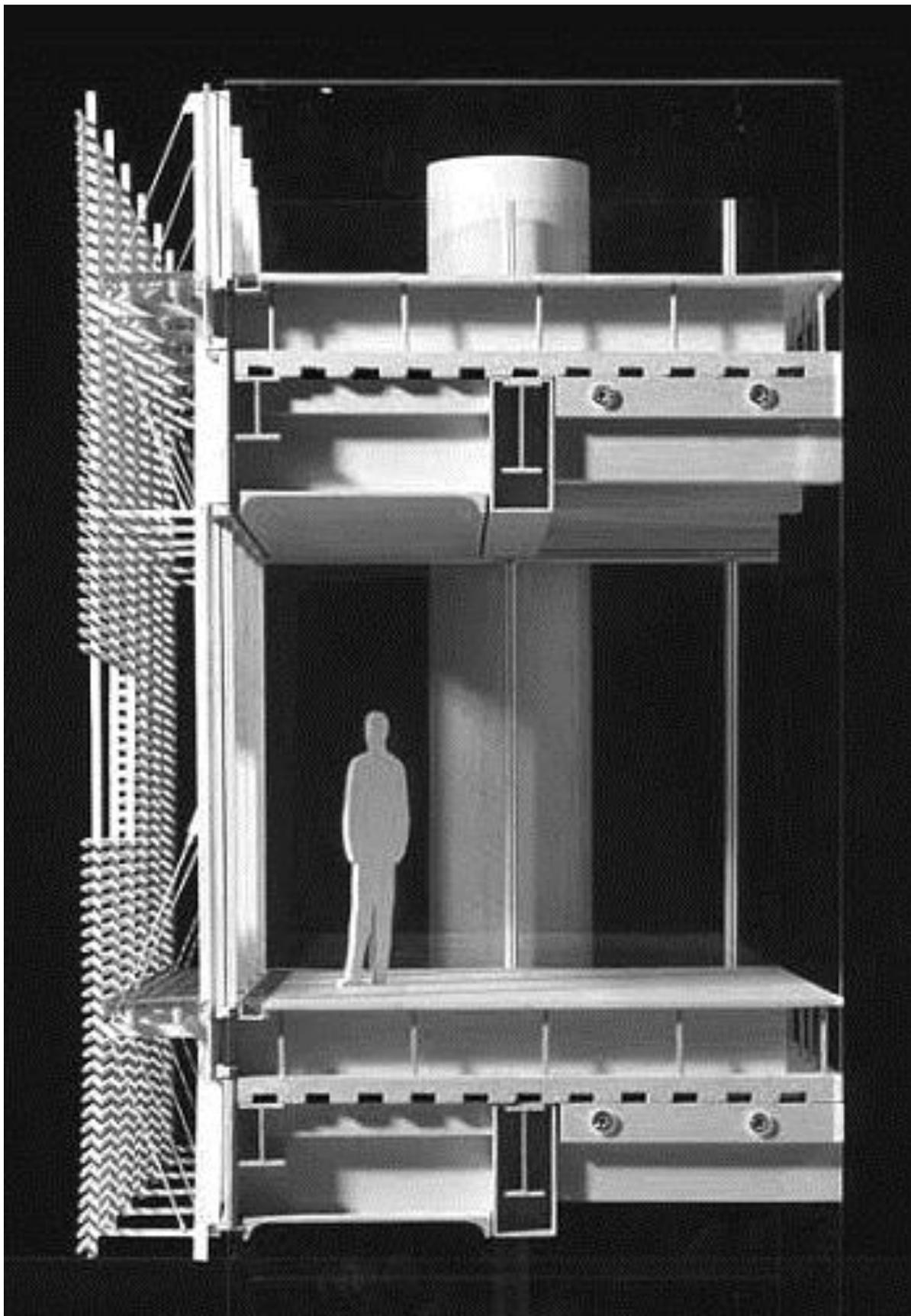
escalas maiores para abordar questões menos estéticas e mais construtivas, como a maquete-detulhe da Figura 29. Contudo, normalmente emulam apenas a geometria da construção, mantendo uma relativa baixa-fidelidade material. Em função disso, esse tipo de representação não serve para uma série de avaliações possíveis e interessantes de serem realizadas sobre uma proposta projetual.

Figura 28 – Maquete de comunicação - Getty Center (Richard Meier, 1997)



Fonte: *Richard Meier & Partners Architects*

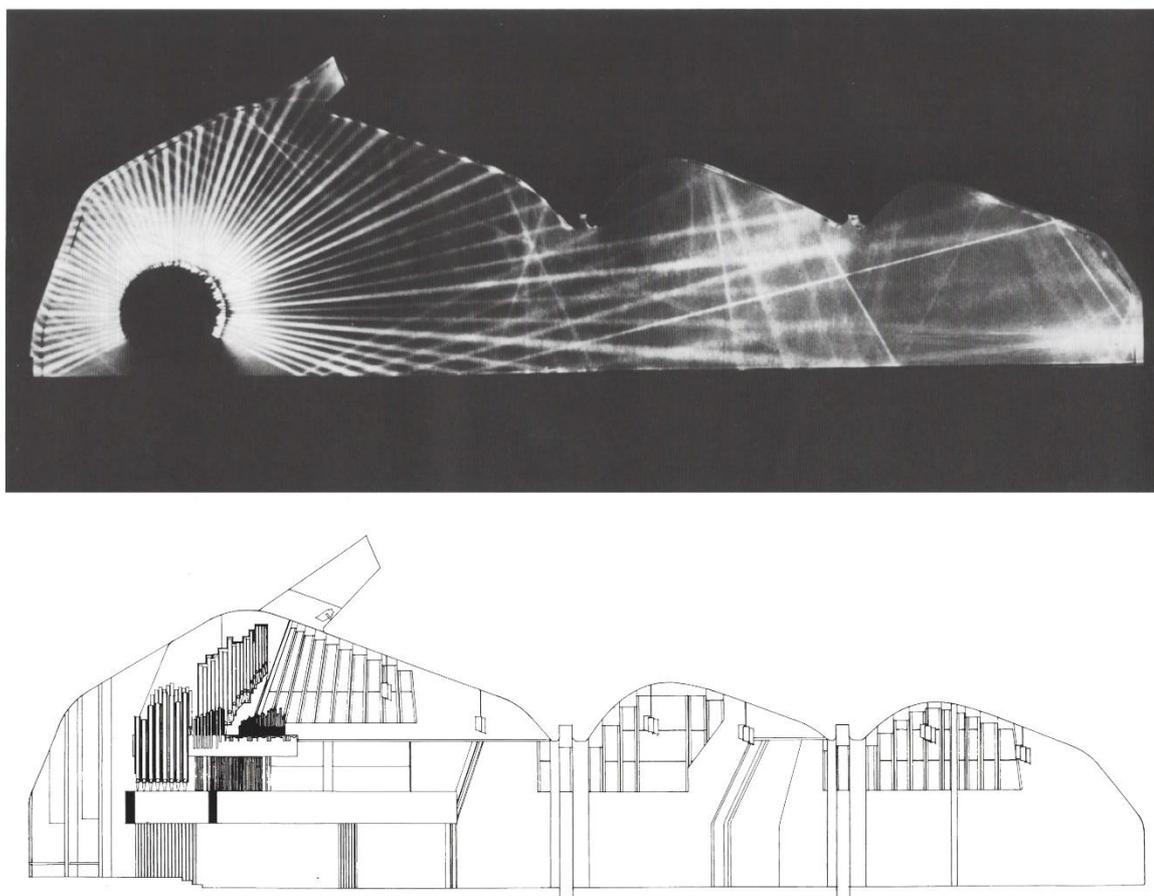
Figura 29 – Maquete-detalhe – New York Times Building (Renzo Piano BW, 1995-1998)



Fonte: *Fondazione Renzo Piano*

Um modo de efetivamente contemplar a realidade física de maneira mais precisa é lançar mão de maquetes de avaliação. Nelas busca-se representar algum aspecto físico e material da construção, mesmo que em escala. Na Figura 30, vê-se um exemplo em que foi elaborada uma maquete com o objetivo de analisar o rebatimento do som no teto do salão principal da igreja de Vuoksenniska, do arquiteto Alvar Aalto (FLEIG, 1995, v. I, p. 222). Nela, à semelhança do diagrama da Figura 19 (página 86), as trajetórias dos sons emitidos por um palestrante no palco do ambiente são representadas por vetores que se rebatem quando encontram as barreiras físicas do teto. Porém, nesse caso, ao invés de serem representadas simplesmente por linhas desenhadas – portanto sujeitas às mãos que as desenhavam – esses vetores são formados por raios de luz gerados por uma lâmpada - o “palestrante” - e que rebatem em um teto feito de um material espelhado. Dessa forma, o modelo pôde simular como o som se comportaria de maneira física, em uma analogia com a luz.

Figura 30 – Corte e maquete de ensaio acústico - Igreja em Vuoksenniska (Alvar Aalto, 1956-1959)



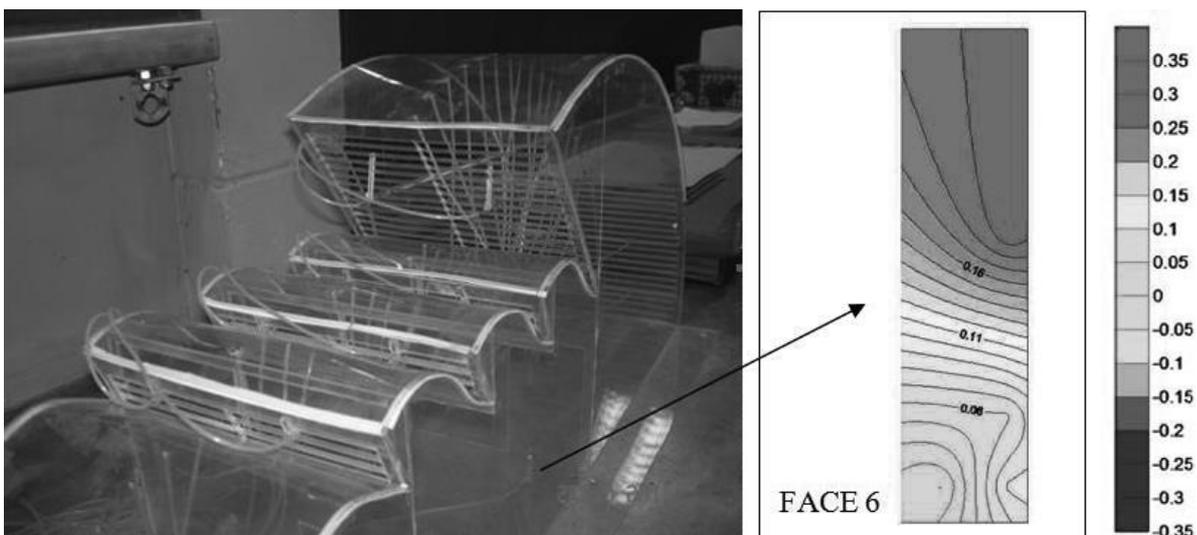
Fonte: FLEIG, 1995, v. I, p. 222

Uma aplicação comum desse tipo de maquete, e que não apela a analogias entre fenômenos, é feita em túneis de vento (Figura 31). Tomando alguns cuidados com a escalabilidade do experimento, com modelos relativamente simples é possível simular com fidelidade a circulação do ar por um edifício. De forma parecida, maquetes podem ser usadas para analisar a interação entre um projeto e diversos outros fatores, como o sol, a transmissão de calor, a umidade, e resistência a esforços etc.

O renomado arquiteto catalão Antoni Gaudí notoriamente fazia uso de maquetes dessa natureza para atingir geometrias extremamente eficientes estruturalmente (MESNIL, 2013, p. 19). Desenvolvia modelos pendurando correntes, que formavam curvaturas com seu próprio peso, e adicionava pesos que deformavam essa curvatura. As formas que surgiam nesse processo, se espelhadas horizontalmente sugeriam o desenho de arcos e cúpulas de formas otimizadas para as cargas a que estariam sujeitas (Figura 32).

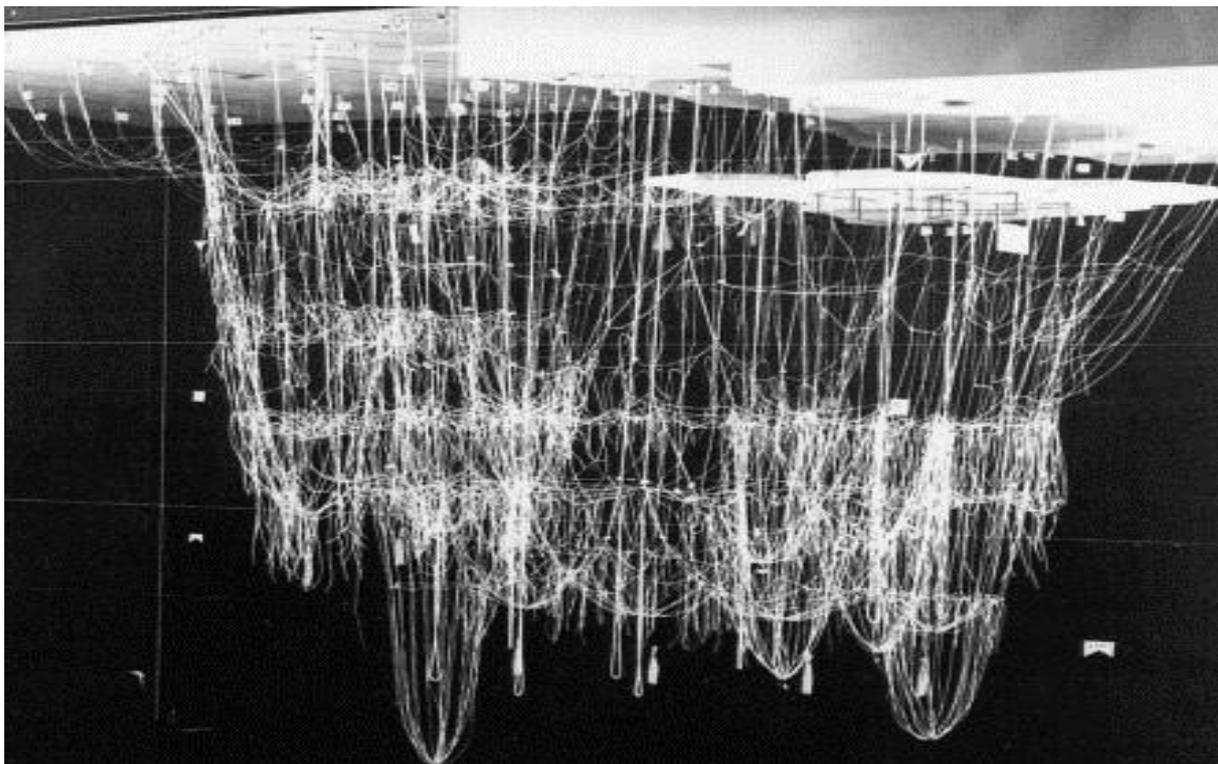
Esses modelos analíticos são usualmente associados a ambientes laboratoriais onde são realizados testes empíricos. Para prever como determinada solução se comportará, são realizados experimentos com representações em escala, porém a mesma lógica é aplicada em ensaios empíricos feitos com materiais reais de obra ou mesmo de componentes completos.

Figura 31 – Maquete de ensaio em túnel de vento – Hospital Sarah Belém (João F. Lima, 2007)



Fonte: CAMARGO, 2011, p. 83

Figura 32 – Reconstrução de um modelo de correntes e pesos pendurados de Antoni Gaudí



Fonte: MESNIL, 2013, p. 19

Figura 33 – Ensaio laboratorial de resistência a compressão de um corpo-de-prova de concreto (esquerda) e ensaio de carga in loco de um guarda-corpo (direita).



Fonte: Disponível em: <arqbrnz.tumblr.com>. Acesso em: Jun 2019.

Ensaio empíricos são muito usados na Construção Civil para comprovar o funcionamento de algum material empregado ou a aderência a padrões normatizados. Casos como a avaliação de esforços sobre corpos de prova de concreto ou testes de carga sobre guarda-corpos (Figura 33) e outros componentes construtivos, são bastante comuns. Ensaio são usados principalmente durante a execução de uma obra – por questões de controle de qualidade dela – e para a certificação de produtos e componentes junto a órgãos normatizadores, como o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia ou a Caixa Econômica Federal.

Figura 34 – Ensaio de carga sobre pilar estrutural – Escritórios Johnson Wax (Frank L. Wright, 1950)

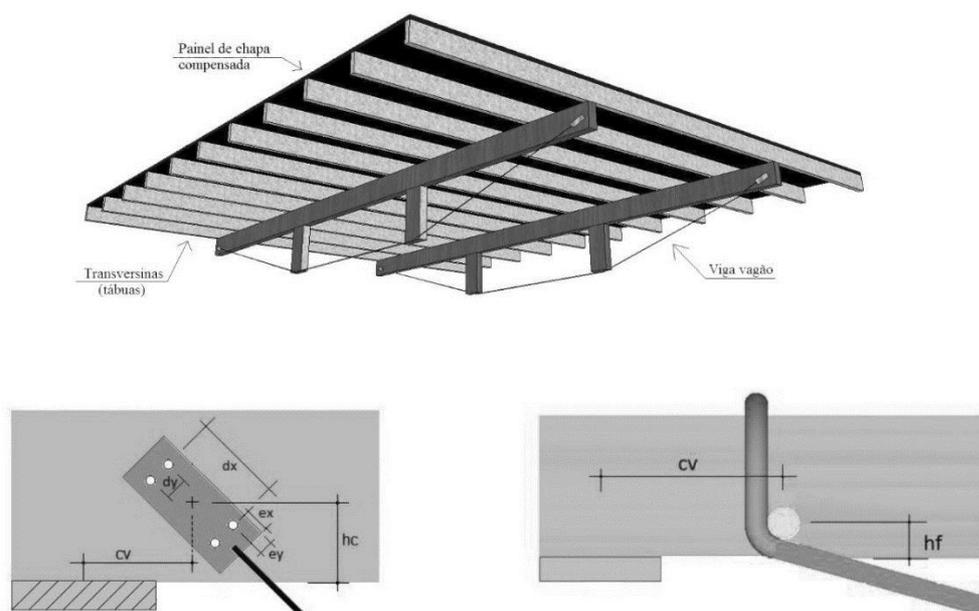


Fonte: LIPMAN, 1986

Na história da arquitetura moderna um caso célebre desse tipo de avaliação por ensaio empírico foi efetuado pelo arquiteto estadunidense Frank Lloyd Wright na construção do edifício *Johnson Wax*. Ele havia projetado um grande salão com pilares de forma incomum: eram muito altos e esbeltos, e ainda por cima ocos. Os engenheiros responsáveis pela obra estavam céticos de que o sistema suportaria a demanda estrutural a que seria submetido e exigiram alguma forma de comprovação. Foi construído então um exemplar do pilar em questão; não um modelo em escala, mas um pilar real com as mesmas dimensões, os mesmos materiais e o mesmo apoio sobre o solo que seriam executados na obra final (Figura 34). Procederam então por

colocar sobre esse pilar uma série de sacos de areia e terra avulsa que equivaliam a dez vezes a carga que o pilar deveria suportar, até o ponto em que veio a desmoronar. Os engenheiros então ficaram satisfeitos e o edifício foi executado com os pilares que Frank Lloyd Wright havia projetado, mas isso só foi possível porque puderam validar a solução com um ensaio em circunstâncias de operação real, ou ao menos próximas do real (LIPMAN, 1986).

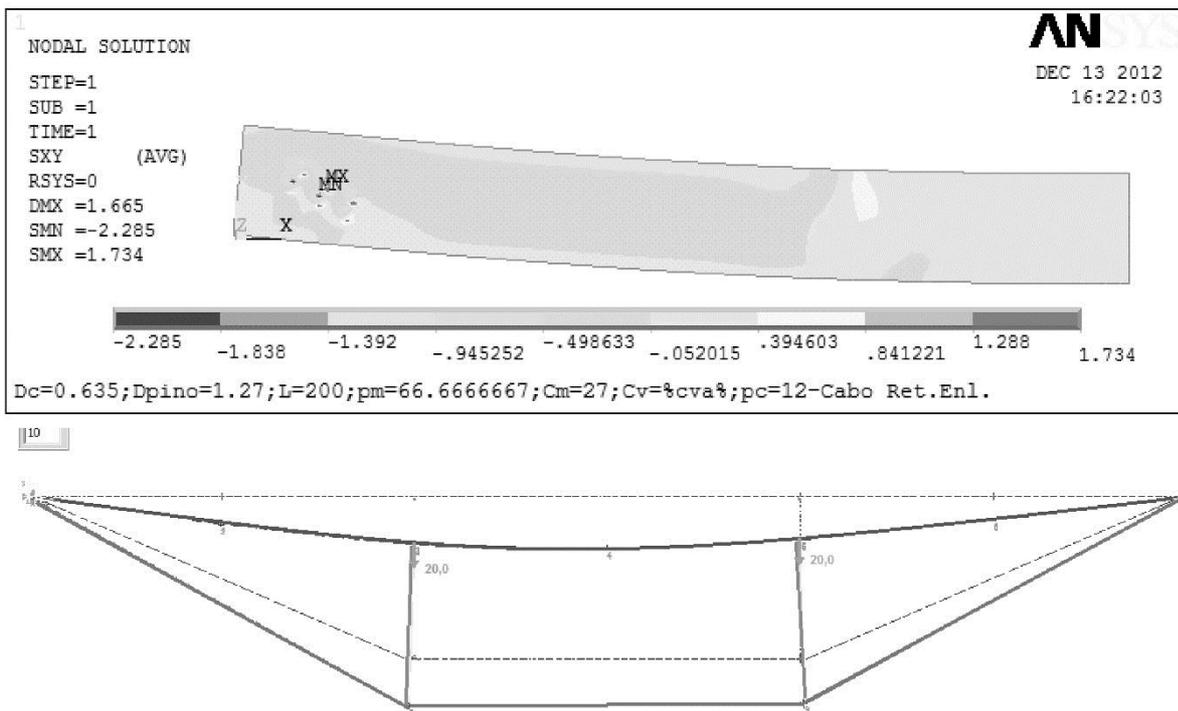
Figura 35 – Projeto e dimensionamento de uma viga vagonada para ensaio laboratorial



Fonte: CUNHA, 2013, p. 40, 42 e 52

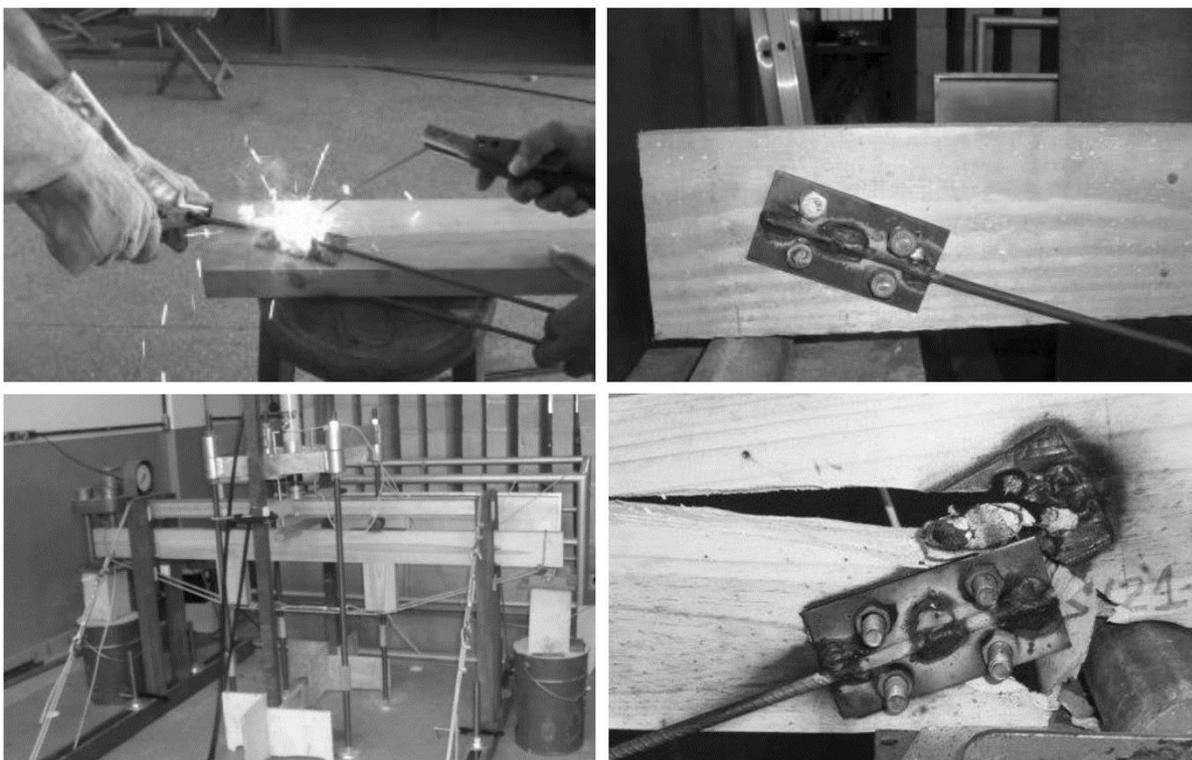
Normalmente ensaios dessa natureza não são encarados como ferramentas de projeto, pois, habitualmente, são efetuados apenas após o desenvolvimento dele, durante a construção. Contudo, ensaios podem ser utilizados no desenvolvimento de uma solução e auxiliar na escolha entre opções possíveis. Em uma dissertação de mestrado em engenharia civil da Universidade Federal de Uberlândia, Cunha (2013) desenvolveu o projeto de uma viga vagonada – uma viga de madeira reforçada por tirantes metálicos – e quis explorar como determinadas variáveis de fabricação afetariam o desempenho estrutural do elemento. Alternando diversas configurações – os tipos de madeira e de fixação do tirante e a quantidade de montantes e de seções de madeira - buscou determinar como cada fator afetava a resistência global da peça (Figura 35).

Figura 36 – Simulação computacional do funcionamento estrutural da viga vagonada



Fonte: CUNHA, 2013, p. 89 e 94

Figura 37 – Construção e ensaio de carga de um exemplar físico da viga vagonada



Fonte: CUNHA, 2013, p. 53, 65 e 85

Primeiro, a pesquisadora fez uma série de simulações computacionais para prever o comportamento de cada configuração de projeto (Figura 36). Depois partiu para construir diversos exemplares físicos e funcionais das vigas vagonadas e submetê-los a ensaios de carga em um laboratório (Figura 37). Dessa forma pôde testar diversas soluções para um mesmo problema, comprovando a eficácia concreta de cada uma de modo empírico.

Apesar desse exemplo não tratar de uma situação de projeto profissional, mas sim de uma pesquisa acadêmica, ele demonstra como é viável verificar de modo concreto a validade e a efetividade de aspectos de um projeto através de modelos e ensaios físicos cuidadosamente elaborados. Contudo, há aspectos que não podem ser analisados com modelos físicos de escala reduzida ou apenas de pequenos trechos e componentes de uma construção. Muitos dos problemas que surgem durante o processo de obra e no uso posterior dela são muito difíceis de prever em função da natureza complexa da Construção. Há muitas disciplinas de projeto envolvidas, um enorme espectro de atividades na execução e há tantas variáveis que podem vir a ser relevantes em toda a vida útil de uma construção que não é possível sequer enumerá-las. Isso traz à tona uma das grandes dificuldades típicas do desenvolvimento de projetos na Construção Civil: avaliar problemas e soluções como um todo e em toda sua complexidade; ou seja, de forma abrangente, segundo a definição de Ulrich e Eppinger.

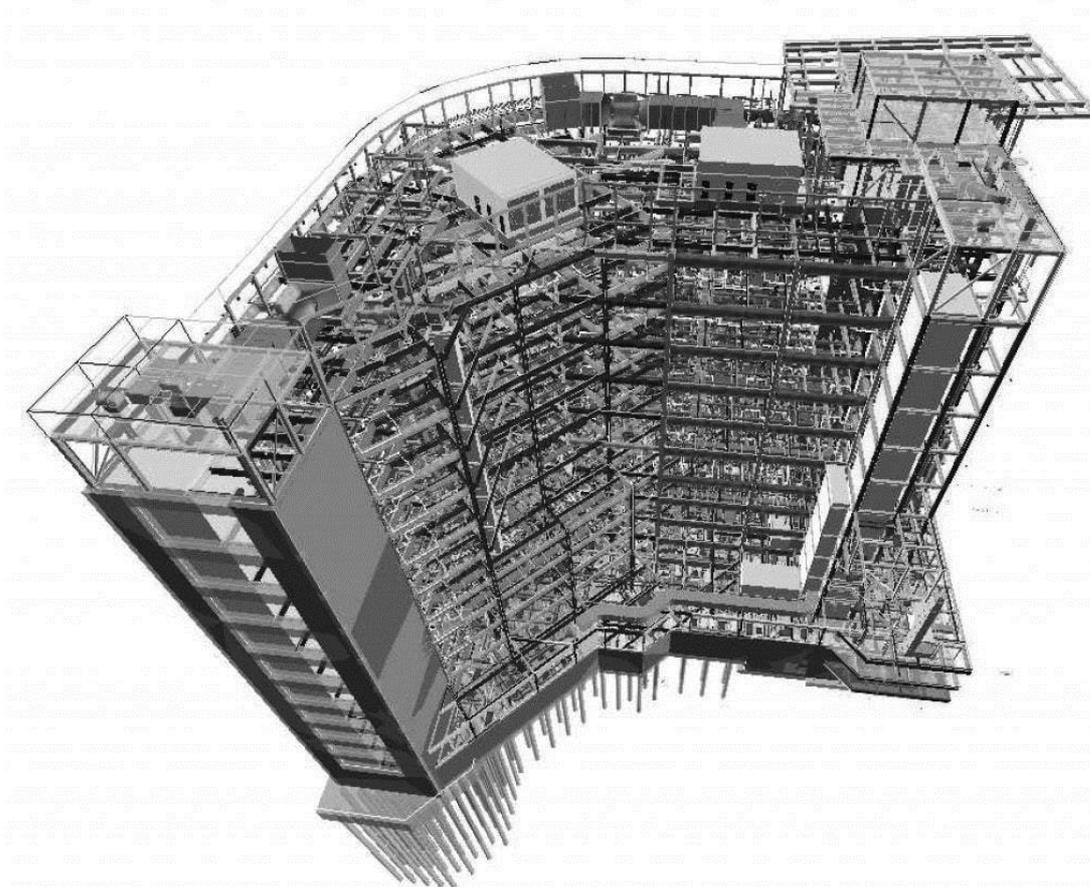
2.3 Representações abstratas e abrangentes – a prototipagem virtual

Como discutido na seção introdutória desta dissertação, a Construção Civil é caracterizada por problemas de execução, assim como com o uso subsequente de seus produtos. Em parte, isso se deve à incapacidade das ferramentas tradicionais de projetos – as representações focadas, sejam elas abstratas ou físicas – em efetivamente abordar a completude dos problemas e soluções. Sempre há questões que surgem somente durante a obra ou após ela, e que não são previstas no projeto pois os instrumentos de trabalho empregados não conseguem enxergá-las. Há inclusive um ditado popular que é corriqueiramente usado no meio e que sintetiza essa insuficiência crônica: “o papel aceita tudo”.

Ao longo das últimas décadas, com o advento da digitalização, o tradicional desenho técnico foi em muito otimizado pelo surgimento de programas de Desenho

Assistido por Computador, ou CAD²⁴. Esses permitem a elaboração digital de desenhos técnicos através de computadores, agilizando e otimizando enormemente o processo de representação gráfica. Contudo, mesmo através do CAD as representações desenvolvidas são extremamente abstratas e ainda bastante focadas, podendo ser um pouco mais abrangentes em função do nível de detalhamento dos desenhos, assim como já acontecia com o desenho técnico à mão.

Figura 38 – Modelo BIM de uma edificação com a integração de diversas disciplinas projetuais



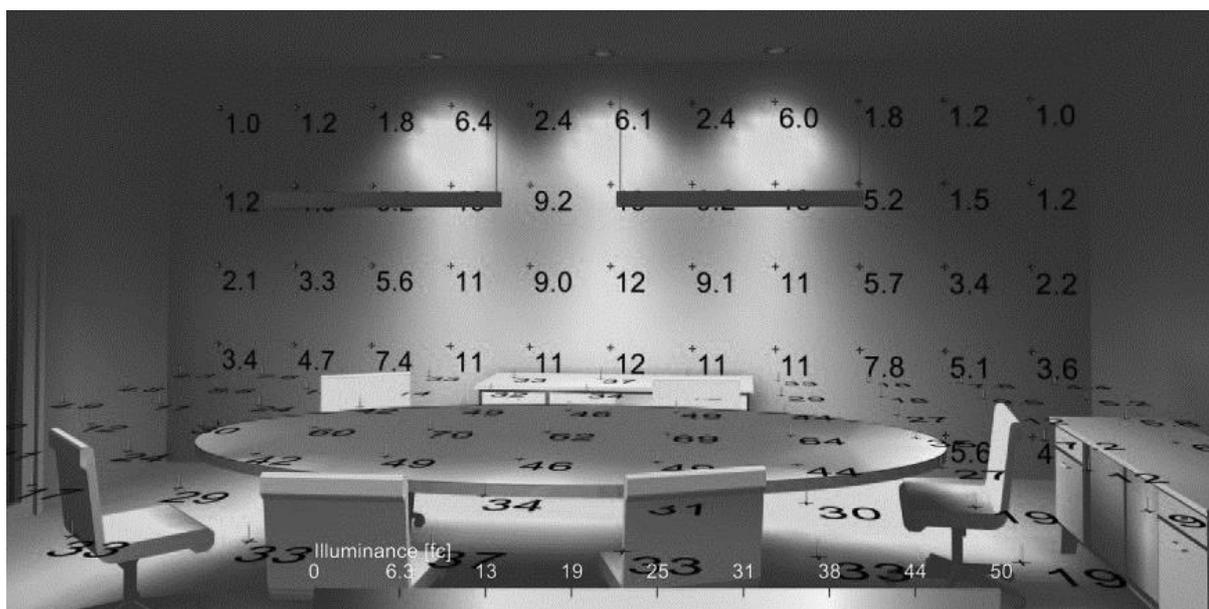
Fonte: CBIC, 2016

Nos últimos anos vem se expandindo no meio, assim como em outras áreas, a utilização de ferramentas cada vez mais avançadas e que transcendem a condição de meros programas de desenho técnico digital. Na Construção Civil têm se dado o nome de BIM - *Building Information Modelling* (Modelagem de Informação da Construção em português) a essas novas gerações de softwares (CBIC, 2016).

²⁴ Em inglês *Computer Aided Design*. A palavra *design*, como foi abordado antes, pode significar tanto “desenho” quanto “projeto” e, portanto, essa tradução também poderia ser “Projeto Assistido por Computador”. Contudo, os programas CAD normalmente são empregados apenas no desenho técnico digital; e *softwares* que permitem simulações mais complexas recebem outros nomes.

Com o CAD, preponderantemente se desenvolve desenhos técnicos bidimensionais, como no desenho a mão, mas de forma digital; ou seja, o processo de raciocínio espacial permanece totalmente na mente dos projetistas. Por outro lado, em *softwares* BIM projetos são desenvolvidos em modelos tridimensionais virtuais que são associados a bancos de dados complexos, que registram diversas informações pertinentes da construção, seus componentes e materiais.

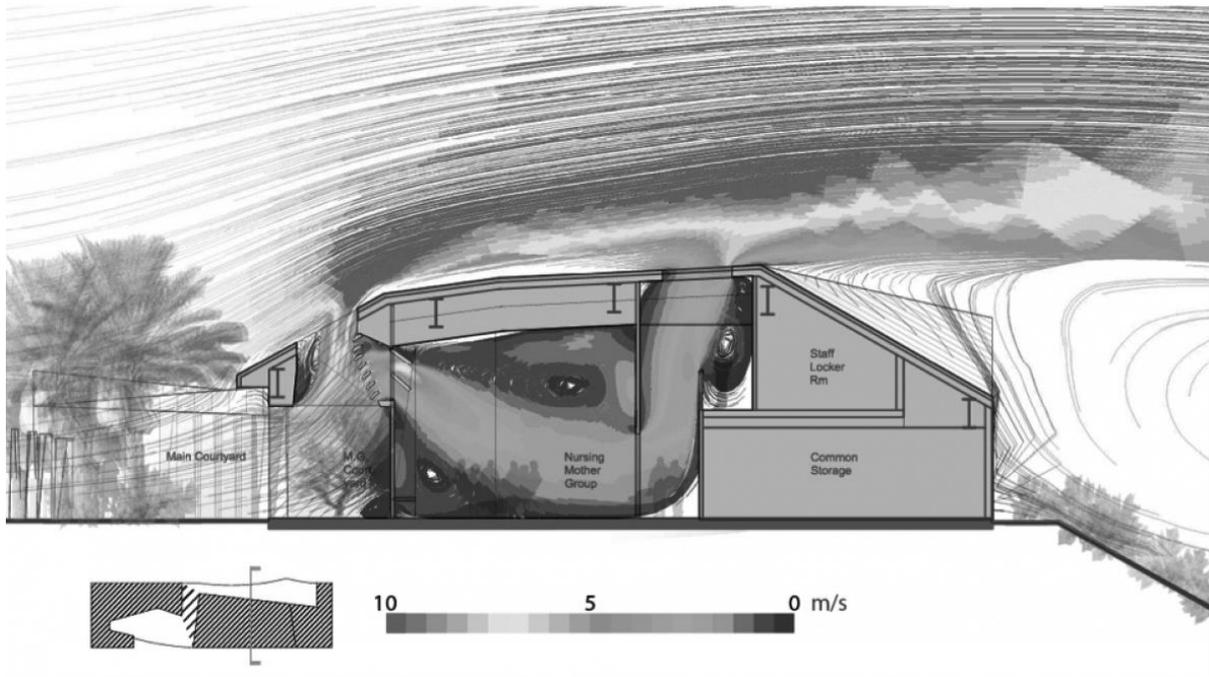
Figura 39 – Simulação virtual da iluminância de um ambiente



Fonte: BUSTA, Hallie. Architectural Lighting, 2015. Plugging in to BIM Disponível em: <archlighting.com/technology/plugging-in-to-bim_o>. Acesso em: Jun 2019.

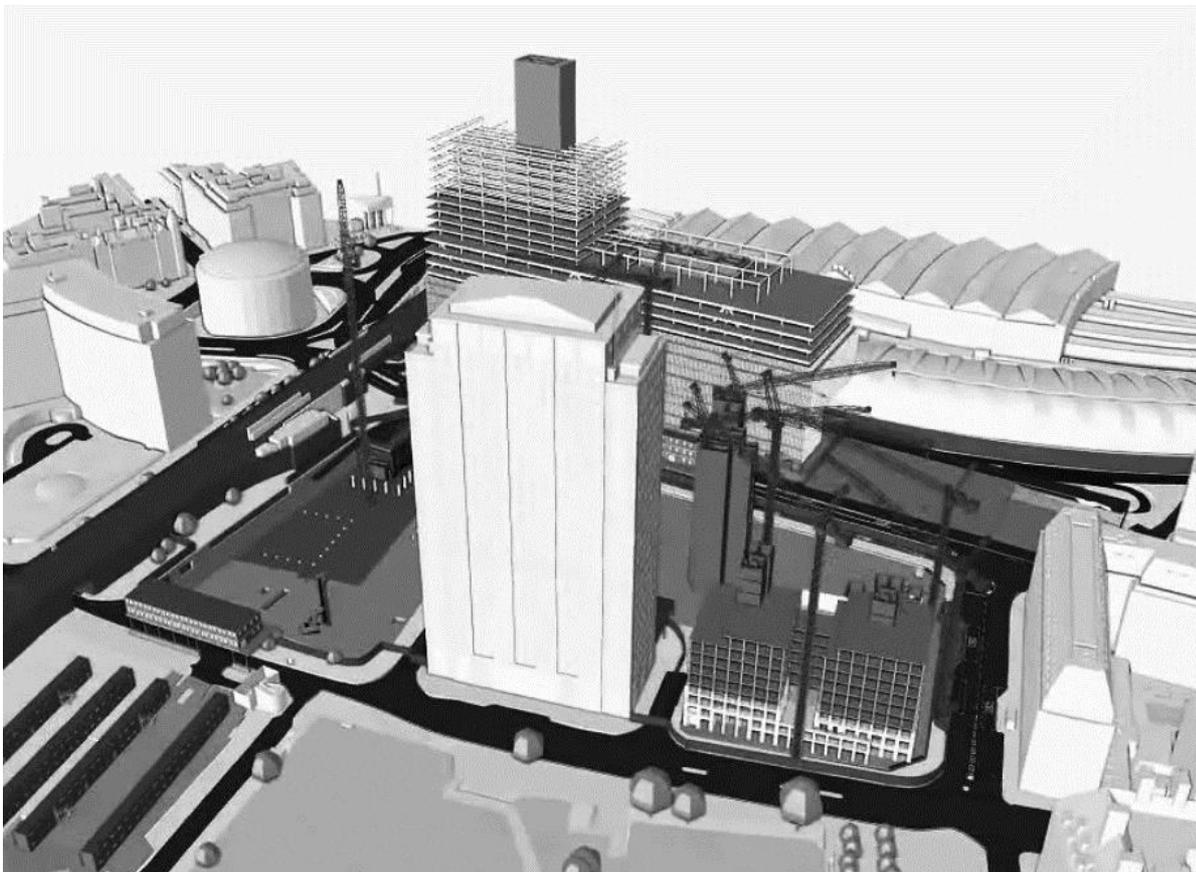
Com esse tipo de abordagem, diversas vantagens das maquetes físicas são incorporadas aos processos de projeto abstratos através da digitalização tridimensional. Através dos modelos 3D virtuais, torna-se muito mais fácil visualizar a integração entre diversas disciplinas, seus diversos elementos, possíveis conflitos e revisar projetos rapidamente (Figura 38). Ademais, incorpora-se aos modelos um amplo espectro de informações associadas aos elementos construtivos, tais como características materiais - resistência estrutural, peso, qualidades térmicas, qualidades acústicas etc. -, custos, dados de fabricação e posicionamento na cronologia de obra. Dessa forma torna-se possível a realização de variadas simulações - ensaios empíricos virtuais - tais como as de iluminação (Figura 39) - análise dos níveis de luminosidade gerados pelo sol ou lâmpadas artificiais - ou de dinâmica de fluidos (Figura 40) - análise da circulação de ar, como se faz em túneis de vento.

Figura 40 – Corte de uma simulação computacional de dinâmica de fluidos (CFD) de uma edificação



Fonte: *MODU Architects*

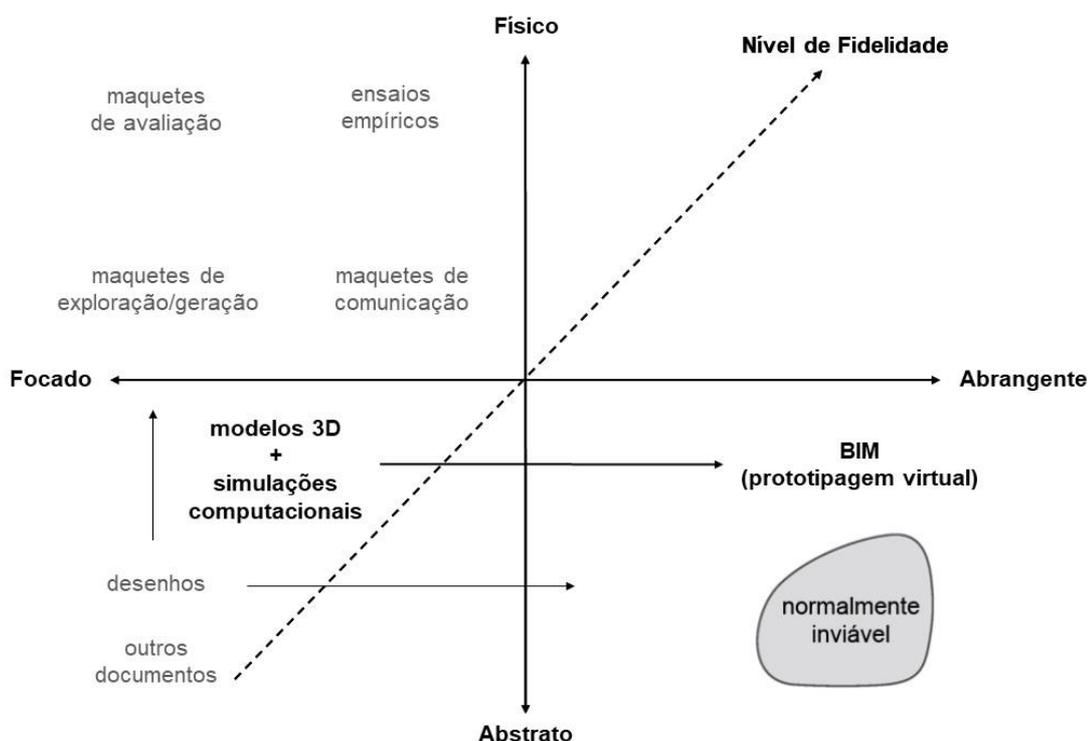
Figura 41 – Simulação 4D da sequência de uma obra



Fonte: OAKWOOD ENGINEERING. 4D BIM (Synchro) Modelling, 2017. Disponível em: <[youtube.com/watch?v=TC69qv1X9VE](https://www.youtube.com/watch?v=TC69qv1X9VE)>. Acesso em: Jun 2019

Ainda é possível analisar questões referentes à integração (HOUDE & HILL; ULRICH & EPPINGER) entre vários subsistemas de um projeto. Com simulações 4D - que emulam as sequências construtivas de obras através modelos BIM - torna-se muito mais fácil visualizar conflitos entre os diversos processos construtivos envolvidos, incluindo a logística de circulação de equipamentos e materiais e outros eventos temporários, além dos elementos fixos do projeto (Figura 41). Assim como ocorre com o Gráfico de Gantt, que inclusive é associado a esse tipo de simulação, esse tipo de representação facilita a visualização, não só de aspectos geométricos da Construção, mas também os cronológicos,

Gráfico 17 – Protótipos virtuais: abstratos, mas abrangentes



Fonte: elaboração própria

Dessa forma, com o uso cada vez mais difundido de modelos virtuais e de programas que permitem análises mais complexas do que era possível anteriormente, a Construção Civil começa a representar projetos de uma forma abrangente, ainda que abstrata. Ulrich e Eppinger (2012, p. 294), apontam que o uso de modelos 3D vem substituindo o desenho técnico 2D em todas as áreas desde os anos 1990 e que esse tipo de representação pode ser designado de “**prototipagem virtual**”. Ainda é incerto até que nível de abrangência a prototipagem virtual conseguirá atingir, mas a

tendência é que persistirá expandindo as fronteiras das representações abstratas enquanto as tecnologias de simulação e modelagem continuarem sendo aprimoradas.

Por outro lado, esses autores também afirmam que “para produtos manufaturados tangíveis, protótipos plenamente abrangentes geralmente precisam ser físicos” e que protótipos totalmente abstratos e abrangentes são “normalmente inviáveis” (Gráfico 5 da página 49 e Gráfico 17, canto inferior direito). Possivelmente em algum momento no futuro os modelos virtuais conseguirão representar toda a realidade relevante a um projeto de construção, mas essa ainda não é a situação vigente.

Protótipos abstratos [...] nunca podem revelar fenômenos que não são parte do modelo analítico subjacente sobre o qual o protótipo se baseia. Por isso, quase sempre é construído ao menos um protótipo físico no esforço de desenvolvimento de um produto. (ULRICH, EPPINGER, 2012, p. 298)

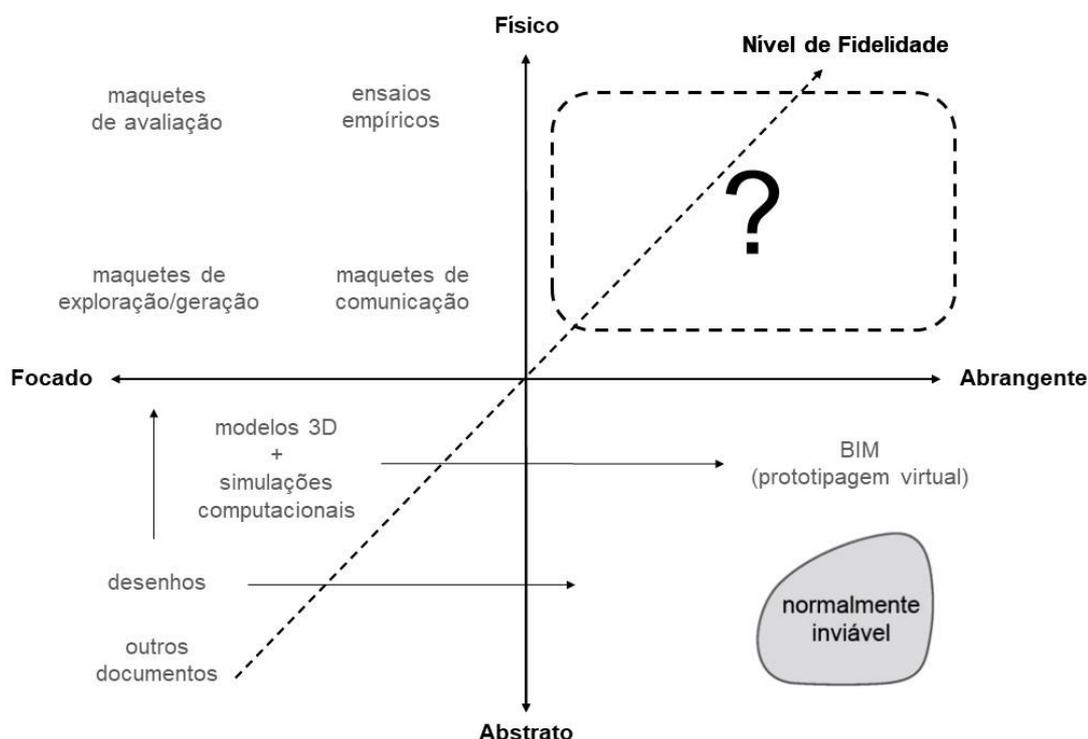
Em qualquer representação abstrata as variáveis de análise são pré-determinadas pelo projetista ou pelo criador do sistema de simulação e, portanto, são necessariamente incompletos. Aspectos que não forem escolhidos intencionalmente para a análise não contemplados nessas representações. Com o avanço da prototipagem virtual a abrangência começa a ser contemplada nos projetos da Construção Civil. Porém, como as construções são produtos físicos, continuam sendo apenas modelos abstratos e, portanto, necessariamente filtrados, até certo ponto. Só é possível testar e validar completamente uma solução de um produto físico antes de sua fabricação final com representações de alta fidelidade: os protótipos físicos e abrangentes.

3 PROTÓTIPOS FÍSICOS DE ALTA FIDELIDADE NA CONSTRUÇÃO

3.1 Representações físicas e abrangentes – Protótipos de alta fidelidade

Protótipos físicos e abrangentes, ou de alta fidelidade, são as representações de projeto mais completas. Nesta categoria se encontram os protótipos funcionais de Chartier e Badev, os protótipos abrangentes de Ulrich e Eppinger e os protótipos de integração de Houde e Hill. Correspondem ao significado corriqueiro da palavra “protótipo”, no sentido que são versões funcionais e em escala real de um produto (ULRICH, EPPINGER, 2012, p. 291). Diversas indústrias fazem uso extensivo desses artefatos nos seus processos projetuais; mas em outras, como a Construção Civil, quase não são vistos.

Gráfico 18 – A dificuldade em atingir a alta fidelidade em projetos na Construção Civil

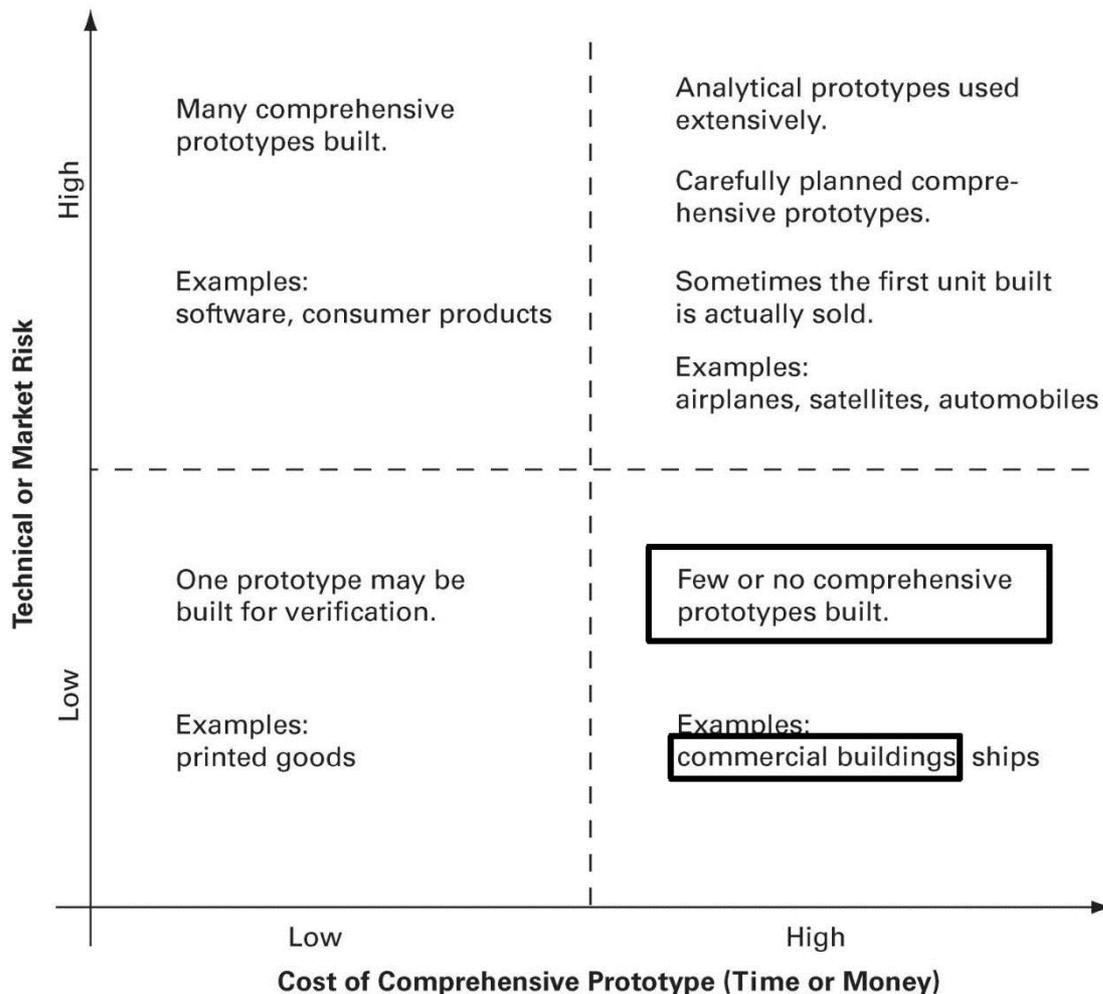


Fonte: elaboração própria

A alta fidelidade permite a execução de avaliações mais aprofundadas, porém também exige maiores custos de fabricação. Por serem muito semelhantes ou até mesmo exatamente iguais a um objeto projetado, através de protótipos de alta fidelidade é possível confirmar, com segurança, que determinada solução é válida e

viável. Podemos detectar defeitos inesperados, comparar soluções e realizar pequenos ajustes finais em projetos já bastante desenvolvidos. Inclusive diversas indústrias, como as de aparelhos domésticos ou as automobilísticas, dificilmente lançam ao mercado produtos que não tenham sido validados por ao menos um desses protótipos, quando não muitos deles (ULRICH, EPPINGER, 2012, p.299).

Gráfico 19 – O uso de protótipos abrangentes em função de seu custo e os riscos inerentes aos projetos



Fonte: adaptado de ULRICH, EPPINGER, 2012, p.299

Ulrich e Eppinger defendem que existe uma correlação entre a frequência no uso de protótipos abrangentes, os custos empregados na fabricação deles e os riscos de implementação do projeto em questão (Gráfico 19). No desenvolvimento de automóveis, por exemplo, a fabricação e teste de um desses protótipo é quase sempre necessária, pois projetos dessa área podem ser reproduzidos milhares, ou até milhões, de vezes. Assim, mesmo pequenos erros em um projeto podem resultar em

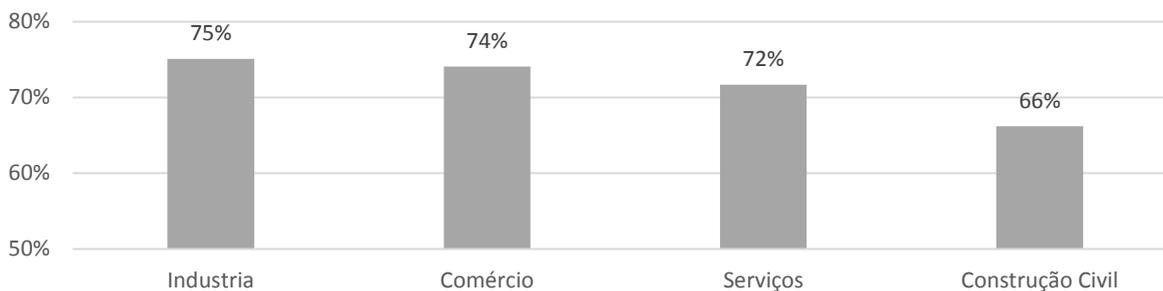
enormes prejuízos, devido ao volume de reprodução que resulta dele. Porém, como esses protótipos têm custo elevado constroem-se poucos, e são minuciosamente planejados. Na medida do possível, elabora-se protótipos abstratos ao invés, para minimizar custos.

Já em projetos de produtos mais simples e baratos, como a bota de neve apresentada por Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler (2018, p. 64), diversos protótipos abrangentes são produzidos. Nesses casos, também há grandes riscos mercadológicos, pois igualmente se sucederá uma produção em massa e produtos defeituosos ou indesejáveis (2018. P. 8) podem gerar grandes perdas econômicas. Contudo, devido à simplicidade e ao tamanho diminuto do produto, nessas situações o custo de fabricação de protótipos físicos abrangentes é relativamente pequeno e o uso extensivo deles se justifica.

Para Ulrich e Eppinger, esses protótipos são pouco usados na Construção Civil porque têm alto custo de desenvolvimento e o setor apresenta baixo risco técnico ou mercadológico (Gráfico 19, destacado no canto inferior direito). Contudo, essa afirmação é contestável, pois existem sim grandes riscos no meio. Há diversas incertezas em projetos do setor, tais como: a grande concentração de recursos em cada produto; o risco da aceitação ou não dele por potenciais clientes; a necessidade de aprovação de órgãos reguladores; a ação e a variação do clima; dificuldades imprevistas na execução de obras; além de uma abundância de erros e incompatibilidades possíveis que podem surgir nos sistemas projetados, visto que normalmente são desenvolvidos por profissionais e equipes completamente diferentes.

Esses riscos que incidem sobre os projetos na Construção podem inclusive ser atestados pela dificuldade que as empresas desse setor têm em simplesmente se manterem abertas. Não é incomum obras serem paralisadas porque apresentaram problemas de projeto ou de execução que levaram a estouros de orçamento e até à falência das empresas envolvidas. O Gráfico 20 demonstra dados de um estudo do SEBRAE (2011, p. 19) onde foi feita uma comparação entre as taxas de sobrevivência, em 2008, de empresas brasileiras de diversos setores. Nesse ano, o crescimento do PIB da Construção Civil superou a média nacional em 3,7% (CBIC, 2013, p. 6), e, ainda assim, o setor continuou sendo, por boa margem, aquele em que era mais difícil sustentar uma nova empresa. Fica evidente que não é possível afirmar que empreender na Construção é uma atividade de baixo risco.

Gráfico 20 – Taxa de sobrevivência das empresas de 2 anos, por setor produtivo, em 2008



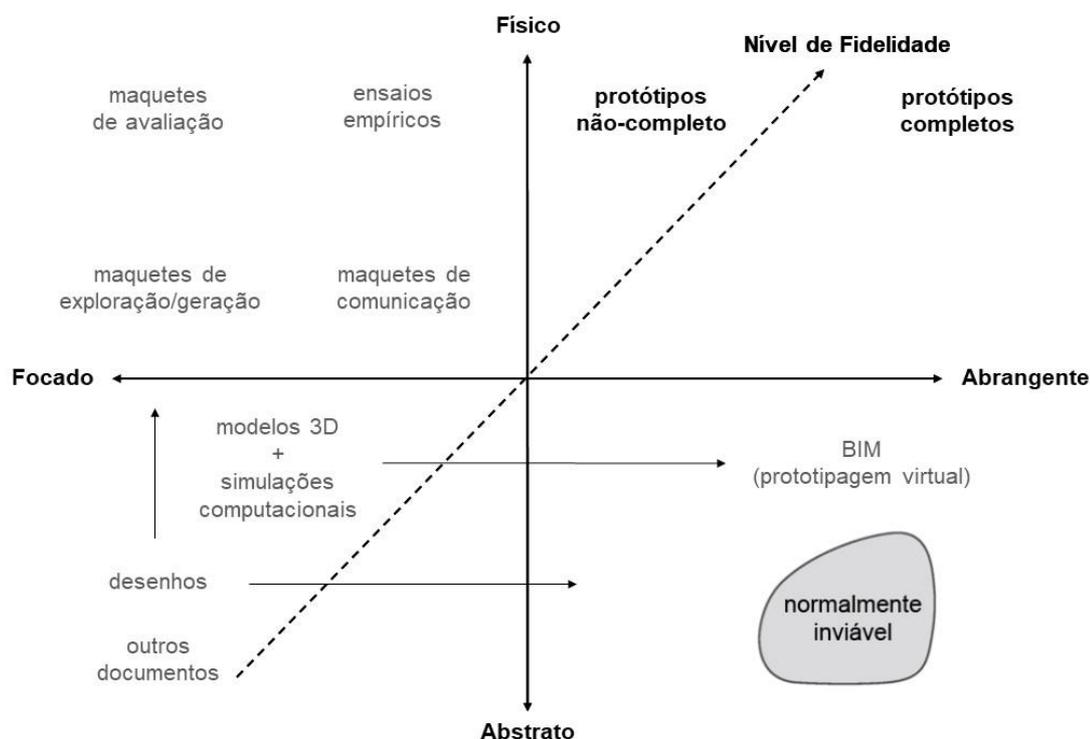
Fonte: Elaboração própria. Dados de SEBRAE, 2011, p. 19

Ao invés, poderíamos afirmar que o emprego de protótipos de alta fidelidade está condicionado à sua viabilidade econômica dentro do processo projetual em que se insere. Essa viabilidade aparenta ser associada ao número de unidades de um produto que serão produzidas a partir de um só projeto. Pode-se perceber que o uso desses protótipos é mais comum em indústrias de produção seriada, onde um só projeto é usado na fabricação de muitos exemplares. Nesses casos o alto custo de fabricação de protótipos de alta fidelidade se justifica, pois esse é diluído ao longo das muitas cópias geradas. Da mesma forma, quaisquer erros de projeto que não sejam dirimidos também serão replicados inúmeras vezes. Portanto, o nível de qualidade exigido desses projetos é maior, ao mesmo tempo em que o custo de fabricação de uma só unidade – o protótipo – frente ao de todas as unidades subsequentes é menor.

Novamente, no projeto de carros, a fabricação de protótipos abrangentes é altamente onerosa, porém, além de ser necessária para verificar inúmeros problemas que advêm da complexidade desse tipo de produto, também é viável, pois seu custo é dividido entre milhares de unidades que são fabricadas subsequentemente. Na Construção Civil, a complexidade dos projetos também pode ser significativa, contudo geralmente não são repetidos, ou então são poucas vezes. Por isso, é muito raro se utilizar protótipos abrangentes no desenvolvimento de projetos na área.

Apesar disso, existem sim exemplos de protótipos de alta fidelidade desenvolvidos em projetos de construção. Neste capítulo, serão apresentados alguns exemplos que evidenciam essa prática, divididos em duas categorias: a dos **protótipos completos** – que representam uma construção inteira - e dos **protótipos não-completos** – que representam apenas partes ou componentes de uma construção (Gráfico 21).

Gráfico 21 – Representações físicas e abrangentes: protótipos



Fonte: elaboração própria

3.2 Protótipos completos

A raridade dos protótipos completos de construções se deve, como foi afirmado, ao fato de que elas normalmente são únicas. A vasta maioria das construções não são repetições exatas de um mesmo projeto, mas sim obras individuais que têm de ser adaptadas a uma série de limitações que advém das circunstâncias de sua implantação. Na maioria dos casos, as obras são executadas *in loco*, e seus projetos são feitos de forma customizada para cada situação específica.

Até ocorre, em certos nichos como a incorporação imobiliária, de um mesmo desenho ser repetido diversas vezes. Nesses casos, até poderíamos considerar que a primeira execução de um projeto serve de “protótipo” para as edificações subsequentes. Inclusive, Ulrich e Eppinger apontam que, em indústrias onde protótipos são muito custosos, “a primeira unidade, às vezes, é efetivamente vendida” (ULRICH, EPPINGER, 2012, p.299). Uma prática semelhante é empregada na indústria automobilística, por exemplo, onde frequentemente se reutiliza uma mesma plataforma em variados modelos e linhas de carros. Dessa forma, a experiência prévia

de um projeto e de sua execução serve de base para desenvolvimentos incrementais em produtos futuros. Contudo, devido às diversas variações impostas pelo local das construções – legislação, topografia, clima, disponibilidade de mão de obra e materiais etc. – essa repetição de um mesmo desenho usualmente significa apenas o aproveitamento de partes dele em projetos posteriores.

Figura 42 – Protótipos de habitação mínima no Quênia



Protótipos em estrutura de tubos de papel (A), de alvenaria (B) e de estruturara leve de madeira com fechamento em alvenaria (C). Unidades implantadas do terceiro sistema (D).

Fonte: SHIGERU BAN ARCHITECTS, 2018.

O uso efetivo de protótipos completos como ferramenta projetual – em que há uma diferenciação entre esses e a os produtos finais - aparentemente só se dá em casos de construções pré-fabricadas e relativamente pequenas. Por exemplo, existem diversos projetos de habitações unifamiliares onde se busca a execução de uma grande quantidade de unidades a baixo custo e em alta velocidade de implantação; normalmente para fins sociais ou emergenciais.

Um caso que exemplifica bem essa questão se deu após um terremoto que devastou a cidade de Kobe, no Japão, em 1995. Em reação a esse evento o arquiteto local Shigeru Ban projetou a *Paper Log House*; um modelo de habitação mínima que abrigou temporariamente diversas famílias desalojadas, para depois ser desmontado

e reutilizado (CARBONARI, LIBRELOTTO, 2019; SHIGERU BAN ARCHITECTS, 1995). As casas foram feitas de materiais baratos, acessíveis e reutilizáveis, como lonas, compensados e tubos de papel; tinham apenas 16m² e não contavam com instalações sanitárias. Ao longo dos anos, esse projeto foi sendo reutilizado em diversas outras situações emergenciais na Turquia (2000), na Índia (2001), nas Filipinas (2014) e no Quênia (2018) e em cada situação o projeto precisou ser adaptado às circunstâncias locais. No caso mais recente, no Quênia, foram construídos três protótipos completos da unidade, cada um empregando um sistema construtivo diferente, para avaliar qual solução se adequava melhor às exigências locais (Figura 42). Em tempos recentes, ao redor do mundo diversos produtos e propostas de abrigos emergenciais semelhantes já foram desenvolvidos; alguns desses são exemplificados na Figura 43 (BARBOSA, MEDES, AIBE, 2012). Contudo, há exemplos mais antigos de protótipos completos de construções relativamente simples como essas.

Figura 43 – Protótipos completos de abrigos emergenciais



Red+Housing, China, 2009 (acima, esquerda); Uber Shelter, Haiti, 2010 (acima, direita), Prototipo Puertas, Chile, 2005 (abaixo, esquerda) e Global Village Shelter, EUA, 1995 (abaixo, direita).

Fonte: BARBOSA, MEDES, AIBE, 2012.

Figura 44 – Protótipo completo – *Maison B.L.P.S.* (J. Prouvé, E. Beaudouin, M. Lods, 1935)

Fonte: CINQUALBRE, 2009a, p.18

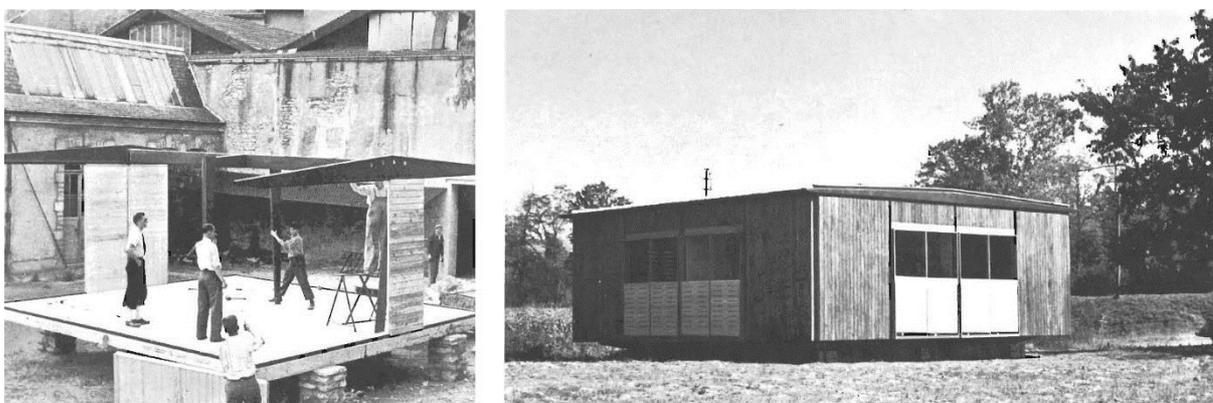
Após a Segunda Guerra Mundial, no contexto da reconstrução na Europa, houve fortes incentivos governamentais ao desenvolvimento de tecnologias de pré-fabricação, principalmente àquelas focadas na construção de habitações sociais (SMITH, 2009; 2010, p. 3-47; KNAACK, CHUNG-KLATTE, HASSELBACH, 2012, p.13-36). Um dos maiores expoentes desse período foi o construtor francês Jean Prouvé, que a partir dos anos 1930 atuou em diversos projetos de edificações pré-fabricadas, predominantemente de estruturas metálicas (HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 178-212; CINQUALBRE, 2009a).

Um ferreiro por formação, mas amplamente considerado um arquiteto, Prouvé desenvolveu quase toda sua carreira dentro de oficinas e fábricas. Inicialmente produzia esquadrias e móveis metálicos para os arquitetos modernistas da França nos anos 20, mas depois, a partir de 1930, começou a se envolver em projetos e construções de edificações inteiras. Até 1950, quando se afastou de sua fábrica por

desentendimentos com sócios, sempre projetou de dentro dos próprios ambientes fabris em que eram executados seus produtos. Em parte devido a essa peculiaridade, Prouvé e sua equipe fizeram uso extensivo de representações de alta fidelidade nos seus processos projetuais, inclusive diversos protótipos completos.

A partir de um sistema de partições móveis de chapas de aço que fabricou e comercializou com sucesso, desenvolveu, em 1930, o seu primeiro projeto de habitação pré-fabricada. Esse desenho não foi executado, mas viria a influenciar uma série de edificações que fizeram uso do mesmo sistema, incluindo a *Maison B.L.P.S.* (1935): uma pequena casa transportável, inteiramente feita desses painéis. Prouvé a desenvolveu em parceria com dois arquitetos, Beaudouin e Lods, e, juntos, chegaram inclusive a construir um protótipo completo (Figura 44) que levava apenas uma hora para ser montado. Contudo, o projeto não foi adiante e nenhuma outra unidade veio a ser fabricada.

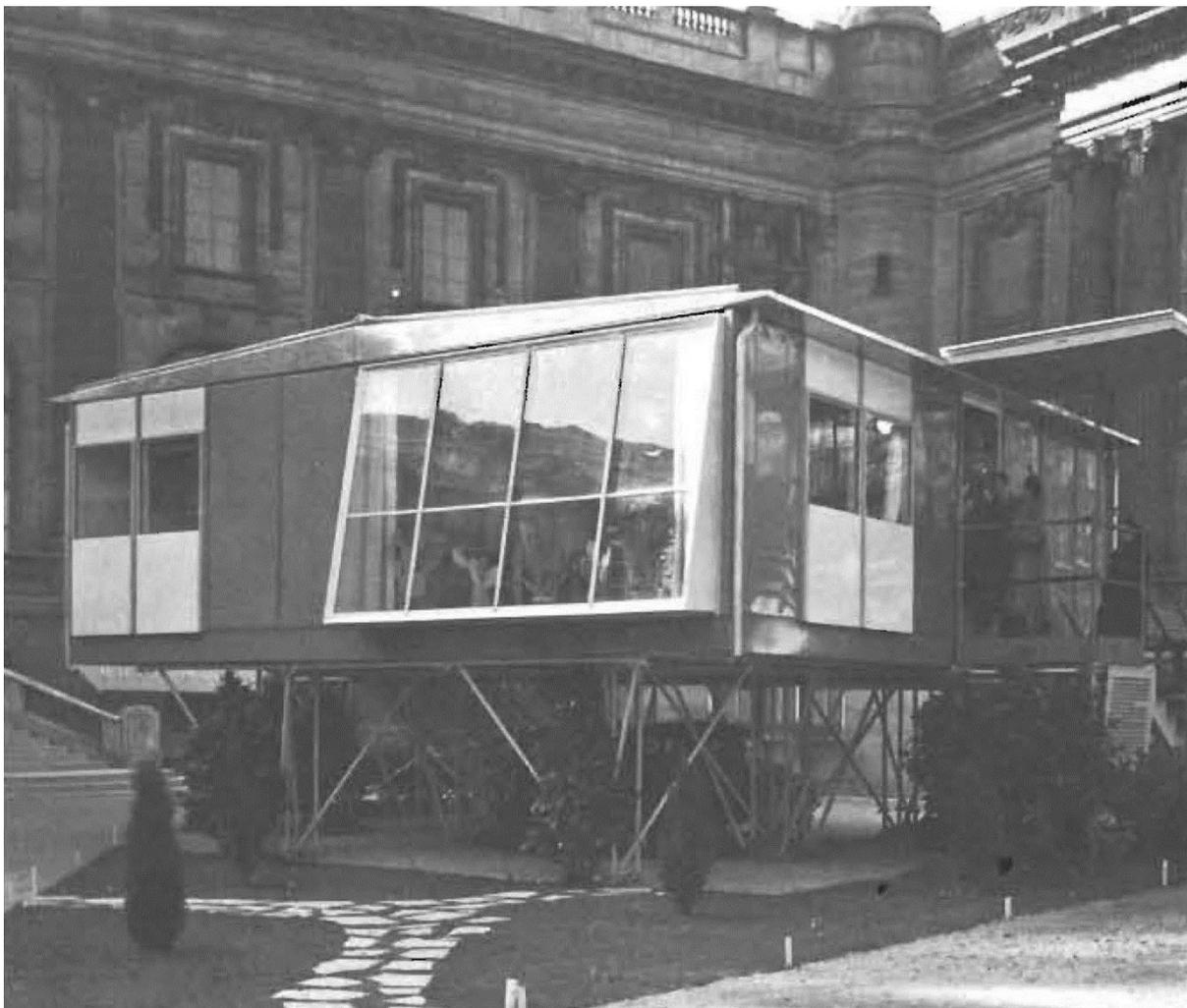
Figura 45 – Montagem de um protótipo completo (esquerda) e uma casa implantada (direita) para o Ministério da Reconstrução



Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 191

Em 1939, com o início da Segunda Guerra, sua fábrica passou a se dedicar à produção de alojamentos para soldados das forças armadas francesas. Esses modelos eram montados com painéis semelhantes aos da B.L.P.S. e 800 unidades chegaram a ser produzidas até as atividades serem suspensas devido à invasão alemã. No fim da guerra, em 1944, a fábrica recebeu uma encomenda do Ministério da Reconstrução da França recém liberada por mais 800 dessas casas para os desabrigados do conflito. A essa altura passaram a ser empregadas uma maior variedade de painéis, misturando aço e madeira, e um sistema de estrutura independente das paredes (Figura 45).

Figura 46 – Protótipo completo de casa pré-fabricada (1949)

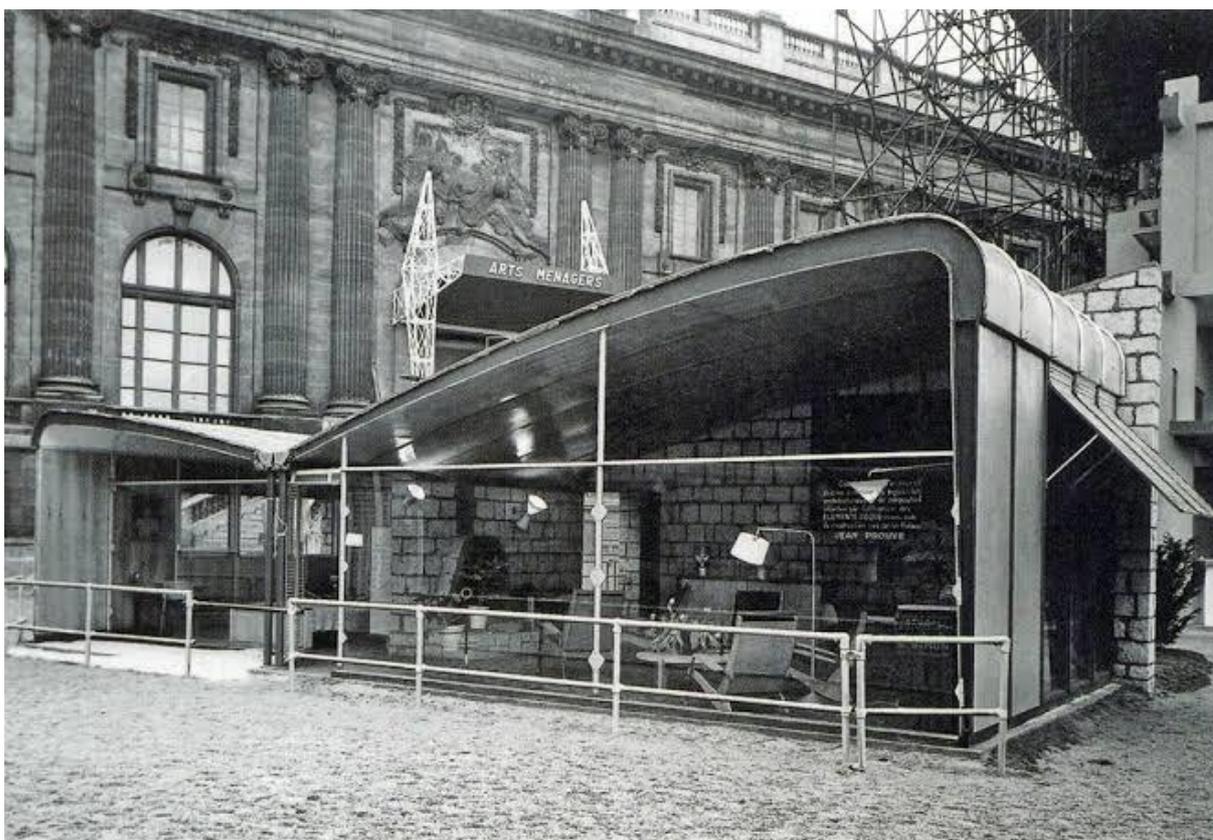


Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 196

Ao longo dos próximos dez anos e de diversos projetos, esse sistema construtivo foi sofrendo mudanças incrementais, variações e acréscimos: estrutura elevada, cortinas de vidro, escadas externas e novos painéis de cobertura, demonstrados nos protótipos das Figura 46 e Figura 47. Em 1949, em um programa piloto, o Ministério da Construção encomendou mais 25 casas, mas que acabaram demorando a ser implantadas. Somente um ano depois de prontas foram montadas em um parque de Meudon, cidade satélite de Paris, e sem a devida orientação técnica. Por isso, diversas alterações foram feitas. Em específico, as casas passaram a se apoiar sobre bases de alvenaria ao invés da estrutura metálica proposta originalmente. Muitas das casas desse período foram desmontadas e remontadas em diversos lugares e até hoje é possível encontrar modelos à venda em galerias especializadas em obras de arte e móveis modernistas (SEGUIN, 2019)

Com base nesse sistema de componentes, e suas gradativas evoluções, Prouvé viria ainda a produzir diversos outros modelos de pequenas casas pré-fabricadas, sempre desenvolvendo protótipos completos. Dentre as mais conhecidas estão as Casas para o Saara (1958), a *Maison Abbé Pierre* (1956), e, talvez a de maior divulgação atualmente, a *Maison Tropicale* (1949).

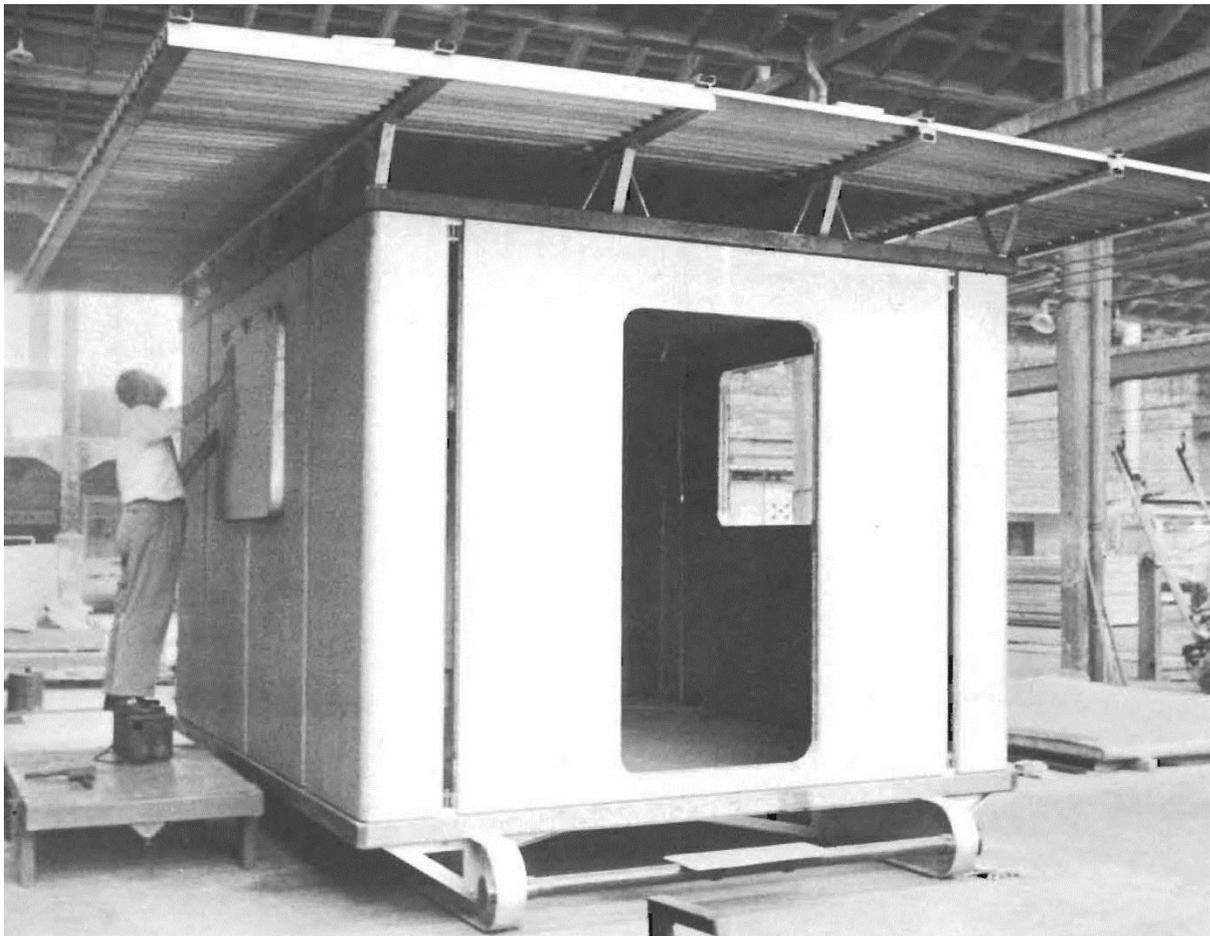
Figura 47 – Protótipo completo da *Maison Coques* no *Salon Arts Menagers* (1952)



Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 196

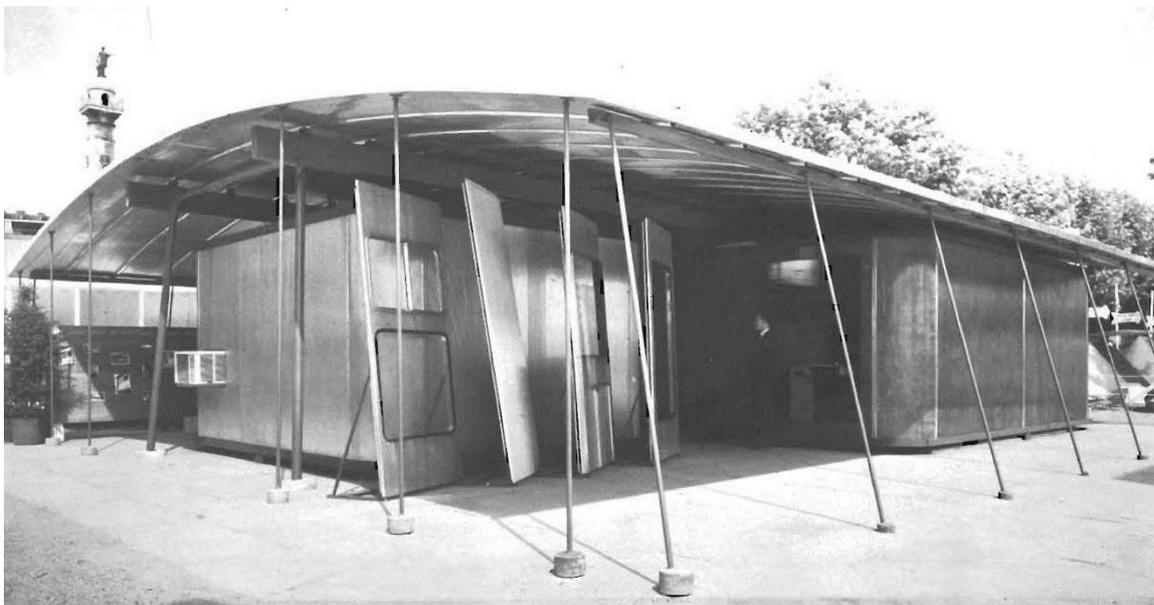
Para as Casas para o Saara, foram desenvolvidas algumas novas soluções no sistema. Para enfrentar a questão do calor do deserto devido à forte incidência solar, foi feita uma separação entre os módulos dos ambientes das casas em si e os das coberturas (Figura 48 e Figura 49). Assim o ar poderia circular entre as duas partes, impedindo que houvesse a transmissão do calor que incidia sobre a cobertura para dentro das casas. Também, alguns modelos menores foram colocados sobre uma espécie de esqui, para que pudessem ser arrastados sobre a areia do deserto (Figura 48).

Figura 48 – Montagem de protótipo completo em fábrica – Casa para o Saara: modelo com esquis para transporte sobre areia (1958)



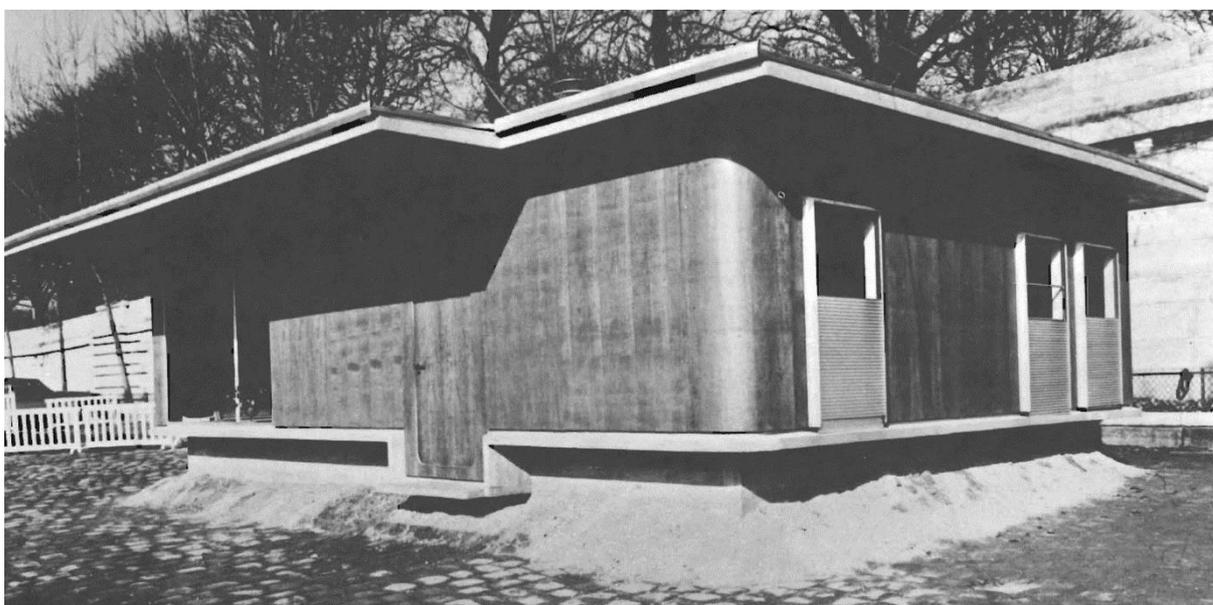
Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 134

Figura 49 – Protótipo completo – Casa para o Saara (1958)



Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 55

Figura 50 – Protótipo completo em construção e pronto – *Maison Abbé Pierre* (1956)



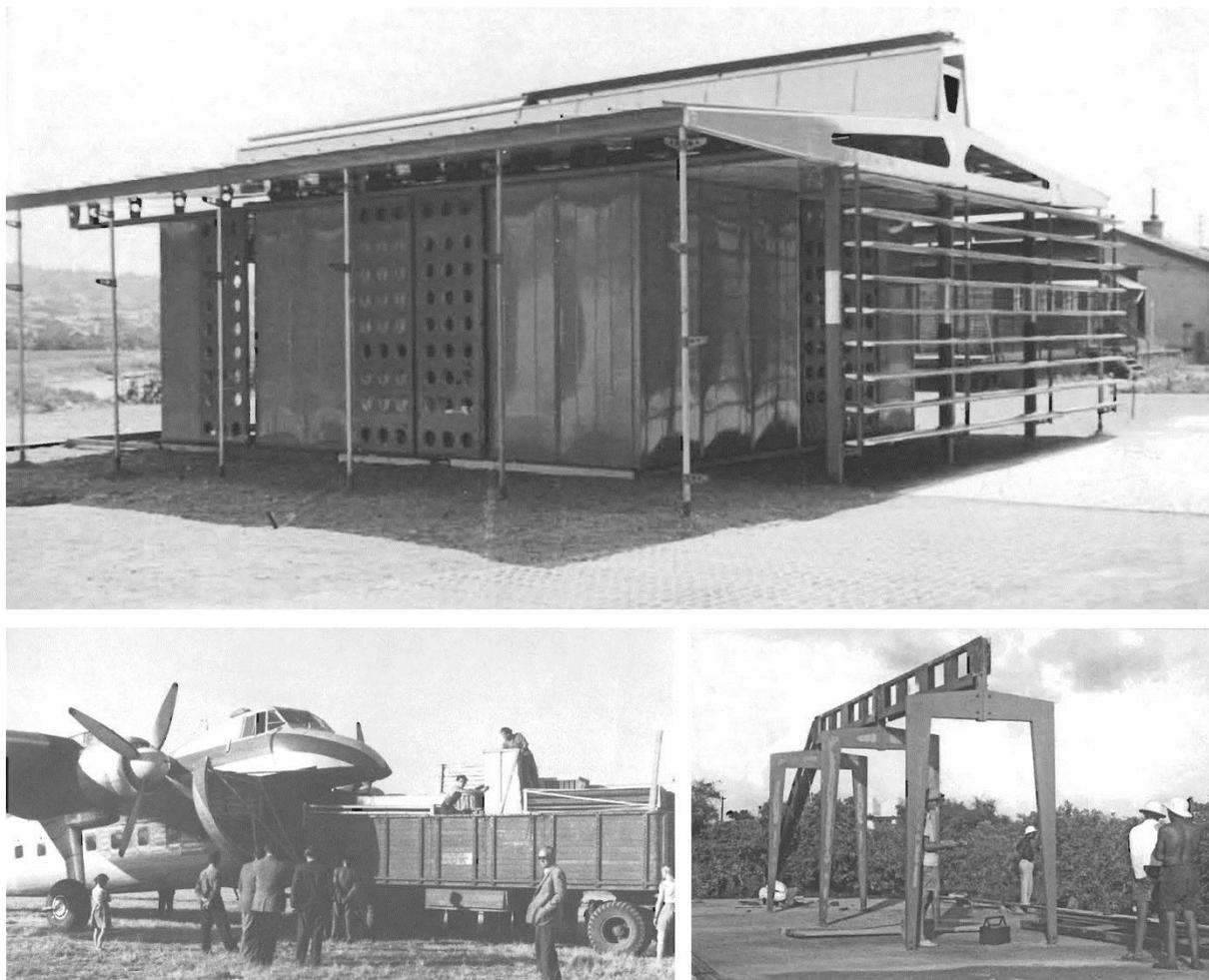
Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 106-107

Já na *Maison Abbé Pierre*, projetada e construída em apenas seis semanas, a maior inovação foi a criação de um módulo único para as áreas molhadas com cozinha e banheiro. Esse módulo foi inteiramente pré-fabricado nas oficinas de Prouvé e levado inteiro ao local de implantação do protótipo, para ser instalado via guindaste (Figura 50).

A *Maison Tropicale* foi projetada em 1949 especificamente para poder ser transportada por via aérea para as então colônias da França na África (Figura 51, em baixo, à esquerda). Baseando-se em todos os desenvolvimentos tecnológicos dos anos anteriores, Prouvé e sua equipe chegaram a um desenho de casa que se adequava às dificuldades impostas pelo clima dos trópicos africanos, através de

alguns novos componentes (CINQUALBRE, 2009b). Foi acrescentado um lanternim, solução comum em edificações industriais, que facilita a circulação natural do ar por uma saída no alto da cobertura (Figura 51, em cima). Também, criou um sistema de *brises-soleil* para o bloqueio do sol incidente no entorno da casa.

Figura 51 – *Maison Tropicale* (1949)



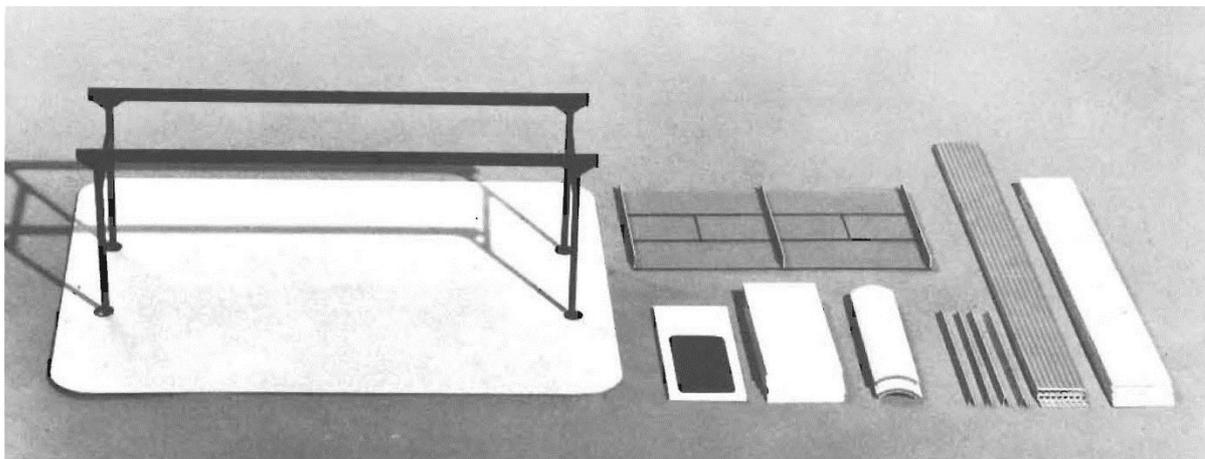
Protótipo completo montado no pátio da fábrica (acima), sendo transportado por avião para Niamey, Níger, (esquerda) e sendo montada no local (direita).

Fonte: CENTRE POMPIDOU, 2009, p.88-97

Durante esse processo de evolução dos desenhos das casas pré-fabricadas e também de outras construções, um aspecto que se destacava na prática de Prouvé é a integração entre as equipes de projeto e as de execução dos produtos.

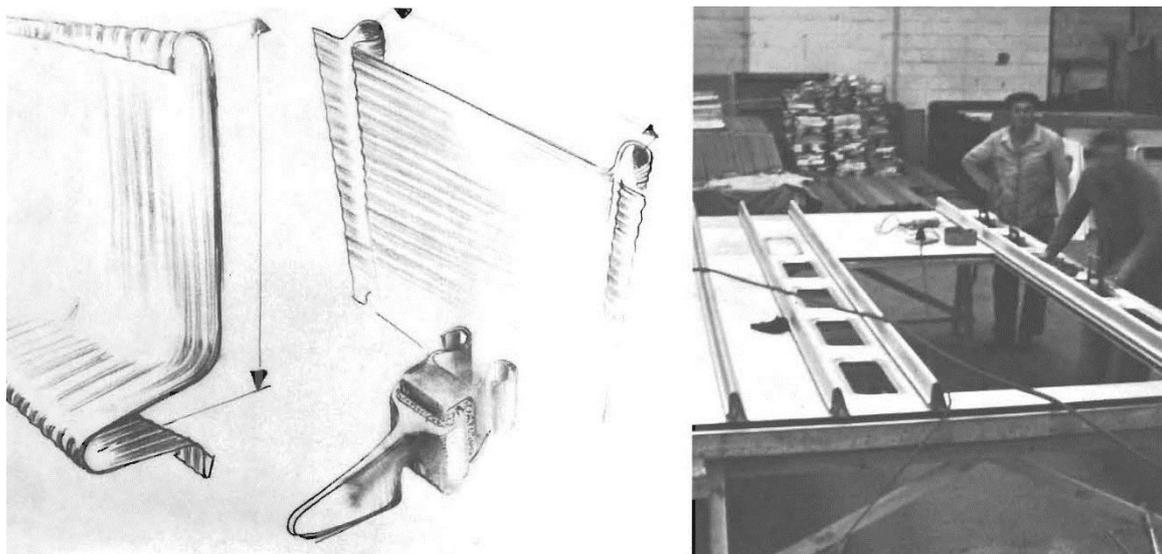
Todos os jovens arquitetos então empregados nas oficinas contribuem para esses diversos projetos e produtos. Todos os envolvidos são de uma só mentalidade, porém constantemente provêm novas ideias cujo potencial pode ser imediatamente avaliado. Pierre Prouvé, irmão mais novo de Jean, colega de trabalho de longa data e de habilidades fabris excepcionais, produz protótipos e modelos [Figura 52] e incorpora neles qualquer coisa que vier à mente dos projetistas. (HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 199, tradução nossa)

Figura 52 – Maquete dos componentes usados nas Casas para o Saara (1958)



Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 55

Figura 53 – Projeto e fabricação de protótipo de um sistema de fachada leve de chapas de alumínio (M Villinger, M. Silvy, J. Prouvé, 1949)



Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 199

O desenvolvimento dessas soluções dentro da fábrica permitiu a constante avaliação das ideias por meio de protótipos de alta fidelidade, produzidos quase que de forma concomitante aos desenhos (Figura 53). As ideias que os projetistas tinham eram logo testadas através de protótipos ou maquetes, e assim sua validade podia ser comprovada ou negada empiricamente antes de prosseguirem em determinado caminho. Inclusive, o próprio Jean Prouvé afirmava que os desenhos técnicos de seus projetos eram consequência dos experimentos nas oficinas e não o contrário. Primeiro vem a prototipagem e os esboços rápidos; e só depois produz documentações técnicas:

Sequência de trabalho:

- a) Uma ideia, seja um móvel ou uma construção.
- b) Um diálogo iniciado imediatamente pelos associados, através de desenhos altamente técnicos.
- c) Protótipo ou modelo.
- d) Avaliações, ensaios, testes, correções, e só então as plantas são desenhadas.

O desenho contínuo custa mais que um protótipo.

(PROUVE, Jean. L'organisation du batiment apud: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 13)

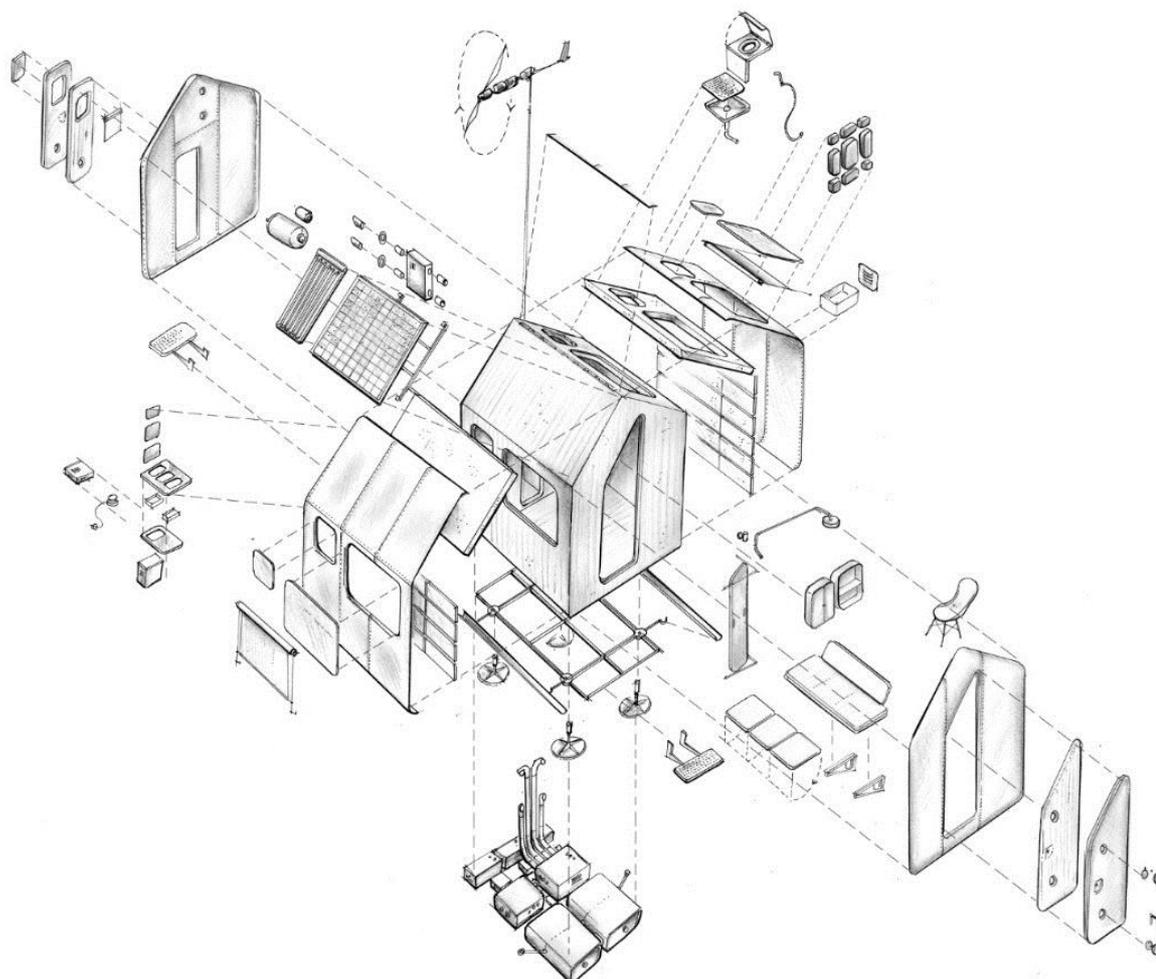
Figura 54 – Protótipo completo - Habitação Mínima *Diogene* (Renzo Piano BW, 2013)



Fonte: RPBW, 2013.

Um caso mais recente, e em grande parte inspirado em Jean Prouvé, é o da *Diogene* (Figura 54), habitação mínima projetada ao longo dos anos 2000 pelo arquiteto italiano Renzo Piano. Em 2013, inaugurou um protótipo para a *Vitra*, uma empresa produtora de móveis. Com apenas 2,50m x 3,00m de área, estrutura de madeira e revestimento externo de chapas de alumínio, essa pequena unidade tem a particularidade de contemplar diversos sistemas prediais. Inclui um banheiro, uma cozinha, instalações sanitárias, instalações elétricas e até mesmo sistemas de reaproveitamento de águas pluviais e de geração de energia solar e eólica (Figura 55). Alguns protótipos completos foram fabricados em seu desenvolvimento, mas que ainda não está completo e ainda não entrou em produção seriada (RPBW, 2013)

Figura 55 – Sistemas e componentes - Habitação Mínima Diogene (Renzo Piano BW, 2013)



Fonte: RPBW, 2013.

No Brasil, para as casas pré-fabricadas mais corriqueiras - as de sistema de painéis de madeira ou de *steelframe* - também se faz uso de protótipos completos; contudo, nem sempre são designados como tal. A maioria das empresas do ramo constroem “*showrooms*” de ao menos alguns dos modelos que comercializam e esses são, essencialmente, protótipos completos (Figura 56). Apesar da intenção primordial com eles ser a divulgação dos produtos para clientes, como são efetivamente fabricados em escala e com as técnicas construtivas finais, servem também para verificações técnicas dos projetos.

De forma semelhante, em incorporações de edifícios residenciais multifamiliares, é razoavelmente comum a montagem de “*showrooms*”, mas apenas de apartamentos, e não das construções inteiras. Também conhecidos como “apartamentos decorados”, neles o nível de fidelidade não é tão significativo, pois nem

todos os sistemas construtivos são incorporados. Como o edifício inteiro não é representado e o objetivo é de somente auxiliar nas vendas - facilitando a percepção visual e espacial dos clientes - normalmente apenas os sistemas de revestimentos e acabamentos são executados. Dessa forma, não chegam a ser protótipos completos, mas sim algo mais próximo dos protótipos visuais ou de experiência do usuário, segundo as definições de Chartier e Badev.

Figura 56 – *Showroom* de casa pré-fabricada em madeira – Modelo Bariloche (Solução Casas)



Fonte: Solução Casas

Talvez a maior referência nacional na construção industrializada e, também no uso de protótipos de alta fidelidade para o desenvolvimento de projetos é o arquiteto João Filgueiras Lima. O Lelé, como também era chamado, iniciou sua carreira nos anos 60, na construção de Brasília, um período em que o país passava por um grande desenvolvimento territorial e de expansão de sua infraestrutura (LATORRACA, 1999, p. 14-31; RISSELADA, LATORRACA, 2010, p. 31-57). Com isso, desde cedo se envolveu com a pré-fabricação devido à necessidade de construir, em pouco tempo, vastas quantidades de edificações e construções excepcionais de grande porte.

Inicialmente se especializou no emprego de elementos pré-fabricados de concreto armado pesado, mas a partir do final dos anos 1970, em uma experiência na Bahia, começou a desenvolver edificações feitas de componentes leves de argamassa armada – um tipo de concreto armado leve. Já na transição para os anos 1990, começou a trabalhar com peças de metais e plásticos. A sua utilização de argamassa armada deu um salto de complexidade a partir de um programa que desenvolveu em Goiás, entre 1982 e 1984, para a implantação de escolas rurais e outros equipamentos de infraestrutura.

Figura 57 – Protótipo completo – Escola Transitória Rural (João F. Lima, 1982-1984)



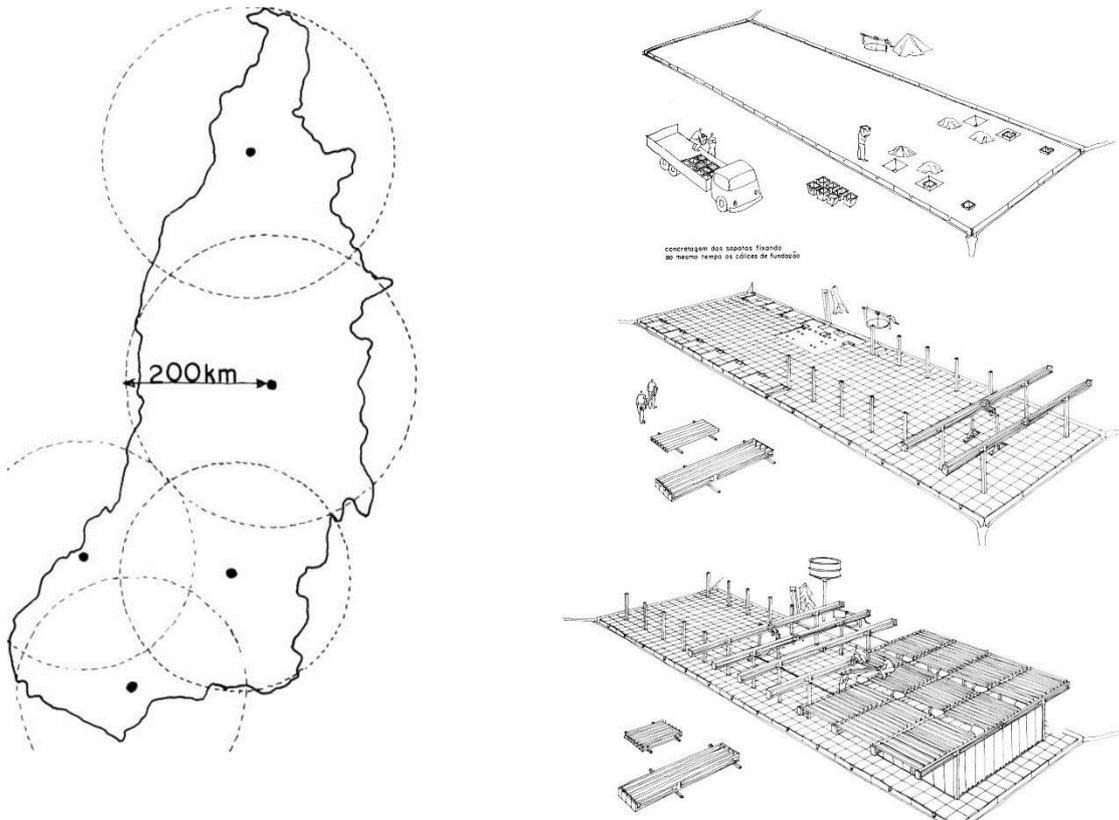
Fonte: LATORRACA, 1999, p. 147

Para atender às demandas da região, cujas populações flutuavam enormemente devido às migrações de trabalhadores rurais, criou um sistema construtivo composto de painéis de argamassa armada que permitia a rápida montagem e desmontagem de escolas temporárias, chamadas de Escolas Transitórias Rurais (LIMA, 1984). Chegou a construir dois protótipos completos e totalmente funcionais, com instalações sanitárias e elétricas, de uma escola para setenta alunos; primeiro um preliminar de madeira e outro já no sistema de argamassa armada (Figura 57).

Nesse programa, Lelé aplicou algumas práticas que lhe eram características. Primeiramente, as construções eram feitas a partir da montagem de vários componentes relativamente pequenos que podiam ser instalados e transportados

facilmente por poucos operários e equipamentos de transporte simples. Assim estabelecia um modelo que poderia se alastrar por um grande território, sem depender de mão de obra qualificada (Figura 58). Também, os componentes desenvolvidos eram modularizados e assim permitiam a configuração de edificações variadas a partir de um só sistema flexível (Figura 59).

Figura 58 – O sistema de componentes modularizados da Escola Transitória Rural

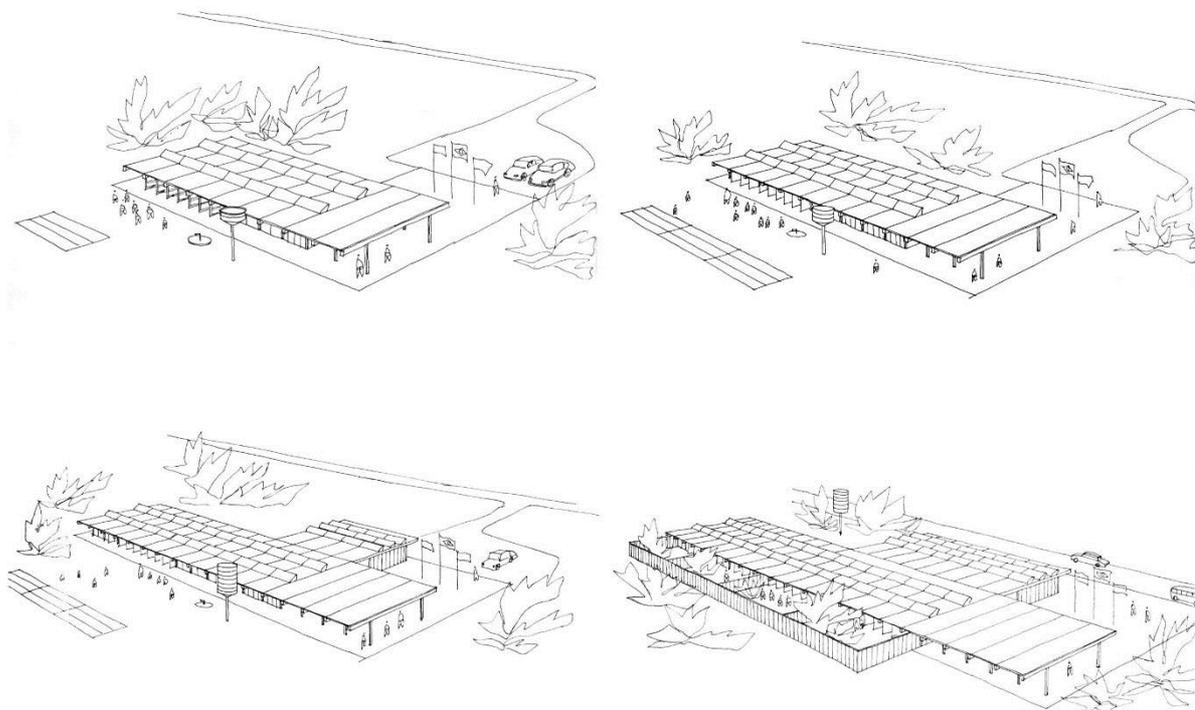


Esse sistema permitiria atender ao estado de Goiás inteiro (à época incluía o Tocantins) com poucas fábricas. A montagem das construções era rápida e necessitava de pouca mão de obra e, mesmo essa, não precisava ser especializada.

Fonte: LIMA, 1984, p. 28-75

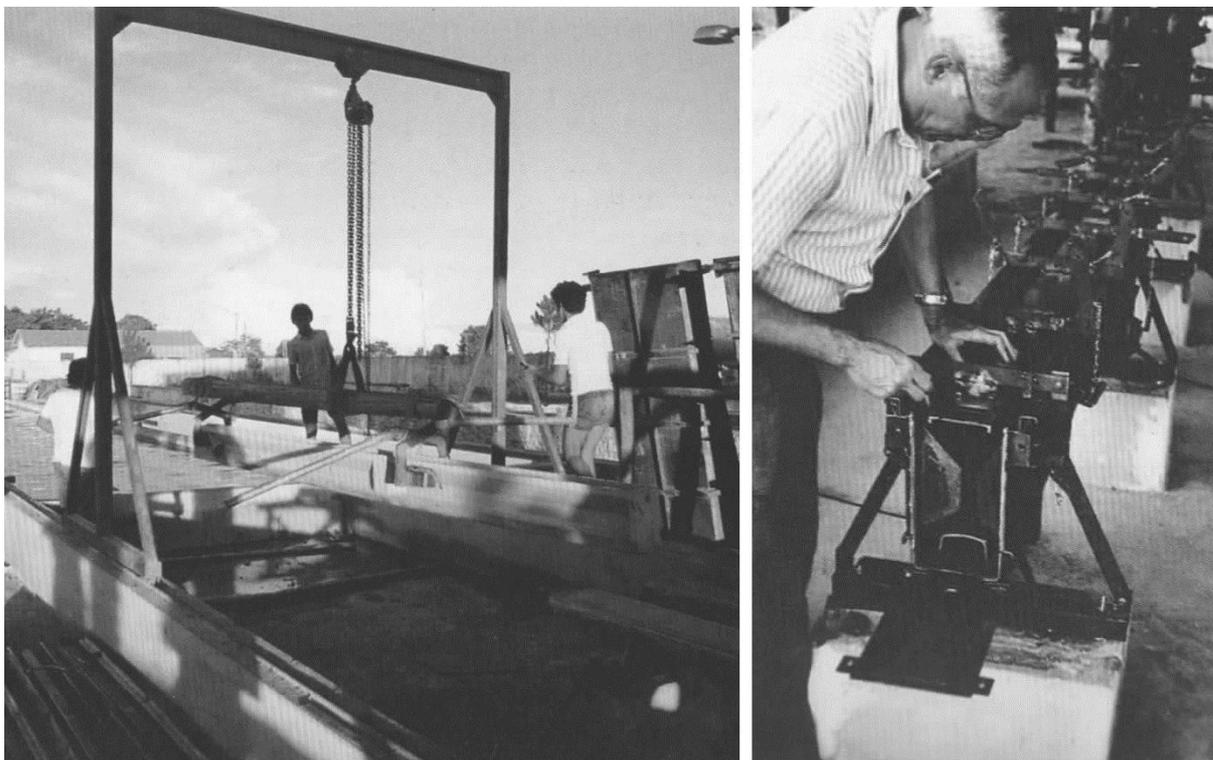
Nesse exemplo, até foram desenvolvidos protótipos completos da escola, mas de certa forma, esses também foram protótipos não-completos de um sistema maior que permitia a construção de diversos modelos de edificação. Assim como com o Jean Prouvé, o fato do processo projetual se dar dentro das próprias oficinas onde são fabricados os produtos permitiu aos projetistas testarem empiricamente cada solução de imediato, através de protótipos (Figura 60). Cada componente pôde ser gradativamente aprimorado, e depois avaliado em sua integração com o todo, através dos protótipos completos.

Figura 59 – Escolas rurais para 50, 70, 120 e 160 alunos, todas executáveis com o mesmo sistema de componentes.



Fonte: LIMA, 1984, p. 19-27

Figura 60 – Fábrica de componentes de Abadiânia, GO, e Lelé inspecionando uma viga sendo feita.



Fonte: LATORRACA, 1999, p. 143

Apesar do programa de Goiás não ter ido adiante, Lelé pôde aplicar essas experiências logo a seguir no Rio de Janeiro, durante o governo de Leonel Brizola e Darcy Ribeiro e depois em Salvador, BA no governo de Mario Kertész. Com isso, o sistema de componentes modularizados de argamassa armada continuou sendo aprimorado e empregado em centenas de construções ao longo dos anos 80 (Figura 61), inclusive de outras tipologias além de escolas (LATORRACA, 1999, p. 148-165). Ao longo dessas experiências, os componentes foram sendo gradativamente aperfeiçoados a partir de observações feitas sobre os protótipos construídos em fábrica.

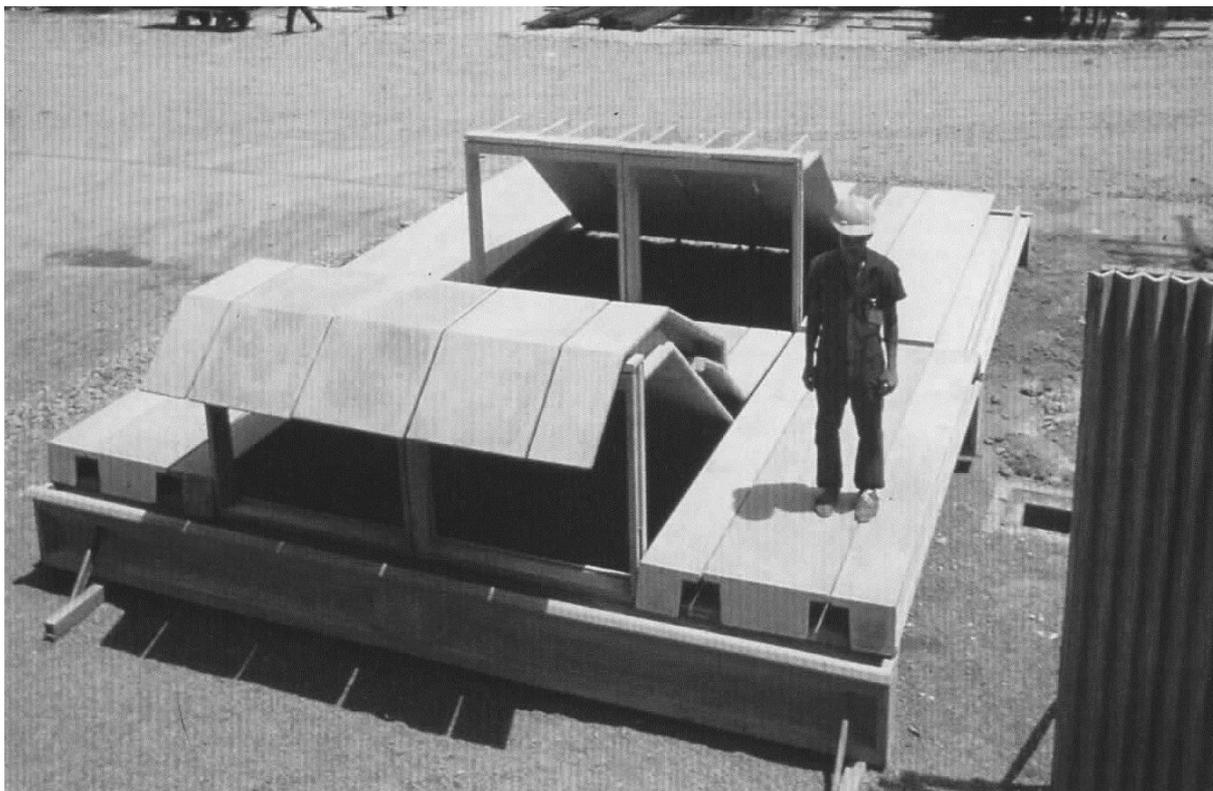
Figura 61 – Escola, creche, centro comunitário e mobiliário urbano construídos com os componentes modularizados de argamassa armada.



Fonte: LATORRACA, 1999, p.148, 153

Um exemplo nítido desse processo é a transformação que se deu com um elemento característico de suas obras: o *shed*, solução semelhante ao lanternim de Prouvé. O desenho dele foi sendo alterado a cada projeto para se adequar ao clima local, mas também para dirimir erros encontrados após a ocupação dos edifícios (PERÉN, 2006, p. 161-172). O *shed* original presente no projeto de Goiás, foi alterado a partir do programa Creches Mais de Salvador (1987). Passou a incluir um colchão de ar entre a cobertura e o forro para melhorar o isolamento térmico que se mostrou insatisfatório (LUKIANCHUKI, 2010, p. 61-62).

Figura 62 – Protótipo de cobertura com *sheds* – Hospital de Taguatinga (João F. Lima, 1988)



Fonte: LATORRACA, 1999, p.164

Na Figura 62, pode-se ver uma variante dessa nova solução usada no Hospital Psiquiátrico de Taguatinga (Brasília, 1988) – edificação já significativamente maior que os exemplos anteriores -, sendo testada através de um protótipo no pátio de uma das fábricas de Lelé. Essas revisões foram possibilitadas pelo jeito peculiar de trabalhar de Lelé que, à semelhança de Prouvé, desenvolvia seus projetos dentro das próprias fábricas dos componentes: primeiro na de Abadiânia, GO, e depois na Fábrica de Escolas do Rio de Janeiro (CIEP) e na Fábrica de Equipamentos Comunitários de Salvador (FAEC). Ao trabalhar em contato direto com as estruturas fabris que depois gerariam os produtos que desenvolviam, os projetistas puderam criar protótipos de alta fidelidade de suas ideias continuamente, validando-as rapidamente através de avaliações físicas.

Pouco após o fechamento da FAEC, em 1989, esse processo culminou com a criação do Centro de Tecnologia da Rede Sarah (CTRS) em 1992 (Figura 63). Esse viria a ser o local onde Lelé pôde desenvolver e fabricar os componentes que usados na construção de uma série de hospitais para essa rede. Essa última fase de sua obra marcou também uma transição para o uso extensivo de componentes metálicos e de plástico, além da argamassa armada; algo tornado possível pela ampla estrutura do CTRS, que contém diversos setores produtivos (Figura 64).

Figura 63 – Oficina metalúrgica do Centro de Tecnologia da Rede Sarah



Fonte: LUKIANTCHUKI, CAIXETA, FABRICIO, CARAM, 2011.

Figura 64 – Setores do Centro de Tecnologia Rede Sarah

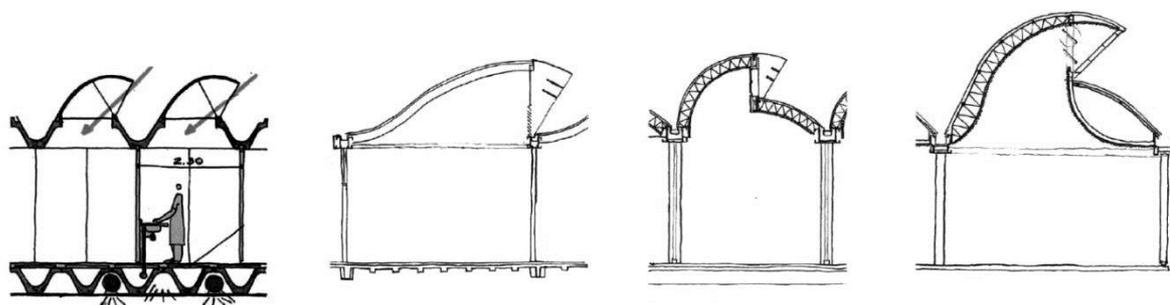


Metalúrgica (A), Metalúrgica Pesada (B), Pré-moldados de Concreto e Argamassa (C), Plásticos e Marcenaria (D), Ampliação não realizadas (E) e o Hospital Sarah Salvador (F)

Fonte: LUKIANTCHUKI, CAIXETA, FABRICIO, CARAM, 2011.

O design original do *shed* de argamassa armada usado em Goiás foi também executado no primeiro hospital que Lelé fez para a Rede Sarah, em Brasília (1980), anos antes da criação do CTRS. A partir do Hospital Sarah Salvador (1992) esses elementos passaram a ser feitos de estrutura metálica e foram sendo paulatinamente modificados a cada projeto (Figura 65), se adequando ao clima de cada local e tendo seu desenho ajustado através de experiências construtivas dentro das oficinas do CTRS (PERÉN, 2006, p. 161-172).

Figura 65 – Evolução dos *sheds* dos Hospitais Sarah



Sarah Brasília (1980), Sarah Salvador (1991), Sarah Fortaleza (1991), e Sarah Rio de Janeiro (2001)

Fonte: adaptado de PERÉN, 2006, p. 221

Dentro da perspectiva de uma reprodução seriada de pequenas construções, como as casas pré-fabricadas, a confecção de protótipos completos é viável, pois são relativamente baratos no contexto em que se inserem. Nesses casos, os sistemas construtivos tendem a ser mais ou menos simples e o próprio tamanho das obras não é expressivo; assim torna-se possível fabricar esses produtos por inteiro e testá-los. Contudo, isso não ocorre com construções maiores, onde os custos tornam-se proibitivos.

A “componentização” da construção contorna essa limitação ao permitir a fabricação e o teste de apenas partes de uma edificação, que por sua vez podem ser replicadas e expandidas. Tanto a abordagem do Lelé quanto a do Jean Prouvé, que tratavam a construção como um conjunto de componentes ao invés de um objeto único, permitiu aos projetistas subdividirem seus produtos, grandes e complexos, em partes menores e mais palatáveis. Esse método facilita o uso de protótipos enquanto ferramentas projetuais na construção, viabilizando-os em obras maiores. Demonstra um possível caminho para contornar a dificuldade que existe em se desenvolver representações de alta fidelidade de construções e consequentemente de validar projetos empiricamente.

3.3 Protótipos não-completos

Para Ulrich e Eppinger (2012, p. 291), “protótipos abrangentes” são aqueles que implementam muitos, senão todos, os atributos de um projeto de uma só vez; portanto, os protótipos completos fazem parte dessa categoria. Contudo, há também aqueles que são de alta fidelidade - representam um produto projetado em escala real e são fiéis ao seu funcionamento material - porém não emulam a totalidade do produto final. Não são cópias exatas do produto completo, mas o são de subcomponentes, partes ou segmentos dele e, assim, permitem a validação empírica das soluções por extrapolação.

Em construções grandes não é possível criar protótipos completos; porém se forem modularizadas, ou “componentizadas”, é possível desenvolver protótipos completos desses módulos ou componentes, que por sua vez equivalem a protótipos abrangentes não-completos da construção como um todo. Protótipos não-completos podem ainda ser usados no desenvolvimento de sistemas construtivos novos, aplicáveis na construção em geral e não só em obras específicas, como no exemplo do sistema de fachadas de alumínio de Jean Prouvé, demonstrado antes na Figura 53 (página 126). Há ainda outros casos, onde são desenvolvidos protótipos de alta fidelidade de grandes segmentos – reais ou ideias – de uma construção. Na Construção, esses nem sempre são chamados de protótipos e aparentam ocorrer em dois cenários: em ambientes acadêmicos, com fins pedagógicos ou laboratoriais; e no projeto de construções excepcionais. Essas podem ser muito grandes, muito complexas ou então aquelas em que são empregadas tecnologias inovadoras, de pouca ou nenhuma validação prévia.

3.3.1 Componentes e sistemas construtivos

Diversos exemplos de projetos de edificações modularizadas foram apresentadas anteriormente. Nesses casos o desenvolvimento de protótipos completos dos módulos, ou componentes, que compõem a edificação equivale ao desenvolvimento de protótipos não-completos da construção como um todo, principalmente quando são testados em conjunto. A modularização apresenta a grande vantagem de permitir a articulação de diversas soluções e construções a partir de um só sistema, o que por sua vez possibilita o aprimoramento incremental desse

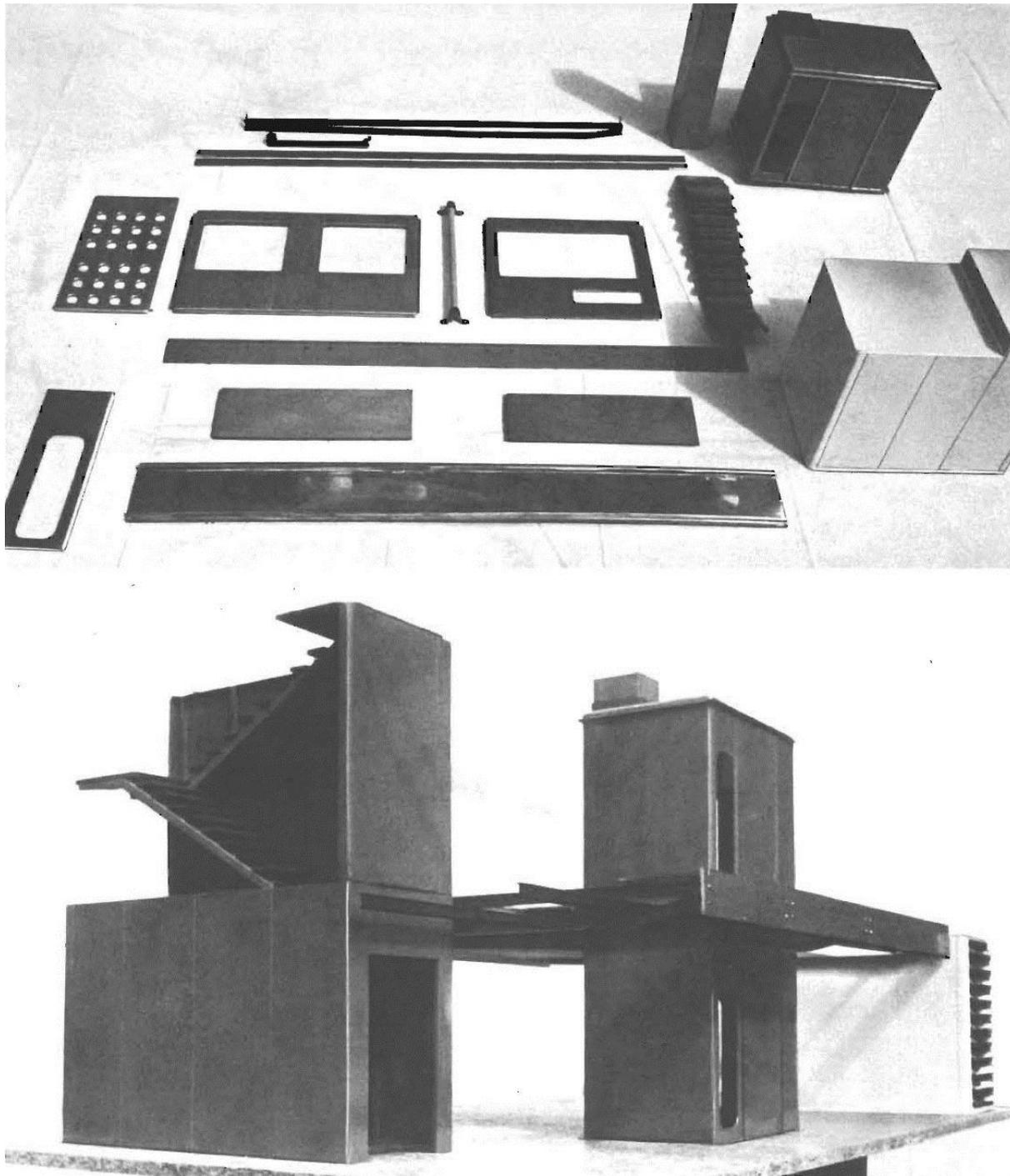
mesmo sistema a cada aplicação, como demonstrado nos projetos do Lelé e Jean Prouvé. O sistema de painéis metálicos do Prouvé, por exemplo, foi utilizado tanto na construção das casas pré-fabricadas padrão apresentadas antes, quanto em casas únicas e customizadas, como a própria residência do arquiteto (Figura 66); e, também, em obras maiores, como escolas, edifícios de escritório, centros comunitários e habitações multifamiliares (Figura 67). Ademais, as obras são enormemente agilizadas pela produção em massa desses componentes dentro de fábricas antes da montagem *in loco* (Figura 68).

Figura 66 – Aplicação de painéis de paredes e esquadrias na *Maison Jean Prouvé* (1954)



Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 129

Figura 67 – Maquetes de um sistema de módulos para construção de edifícios multifamiliares de vários andares (J. Boutemain, Friederich, J. Prouvé, 1951)

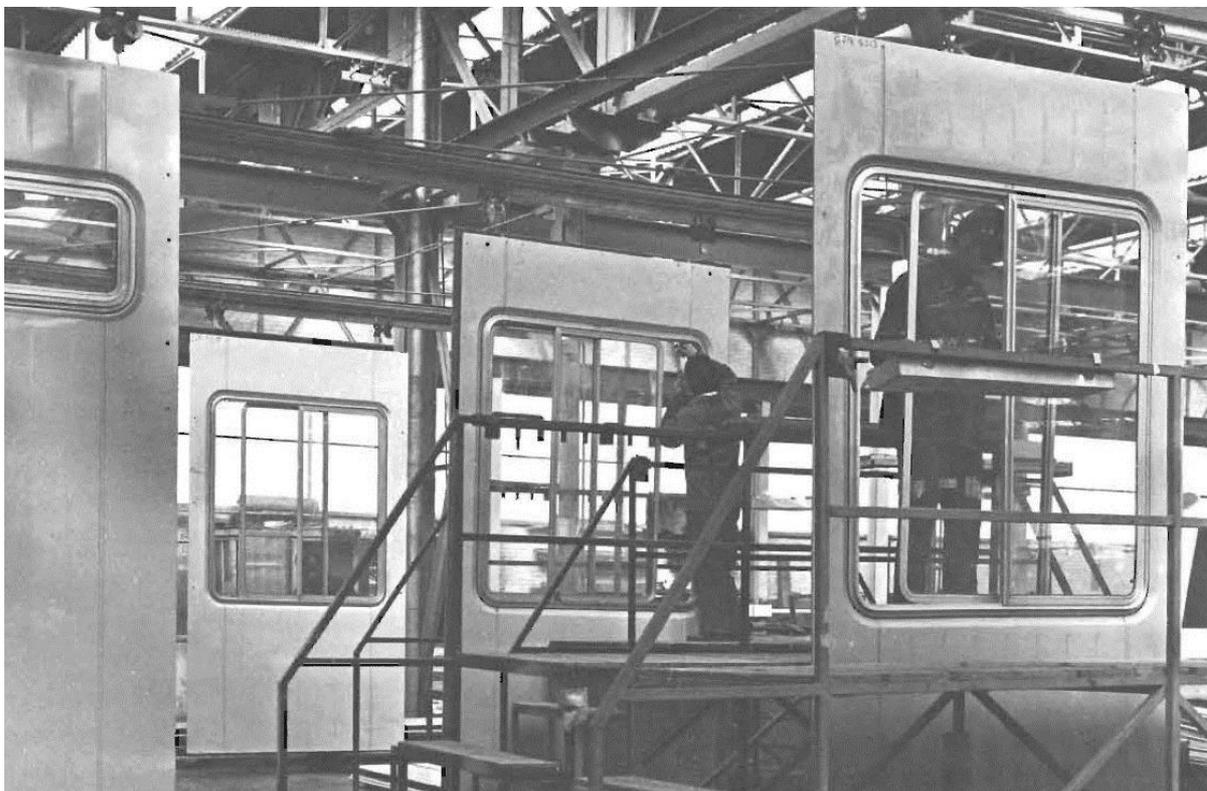


Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 110

O desenvolvimento desses componentes se deu através de protótipos e maquetes produzidos dentro das oficinas de Prouvé (HUBER, STEINEGGER, 1971, p.199). Por meio de pequenos protótipos abrangentes, os projetistas puderam avaliar uma série de características de suas soluções: encaixe das partes, resistência mecânica, acabamento etc. Nas Figura 69, Figura 70 e Figura 71 são apresentados

alguns protótipos abrangentes não-completos, de componentes usados no processo de desenvolvimento de sistemas construtivos, usados em diversas construções.

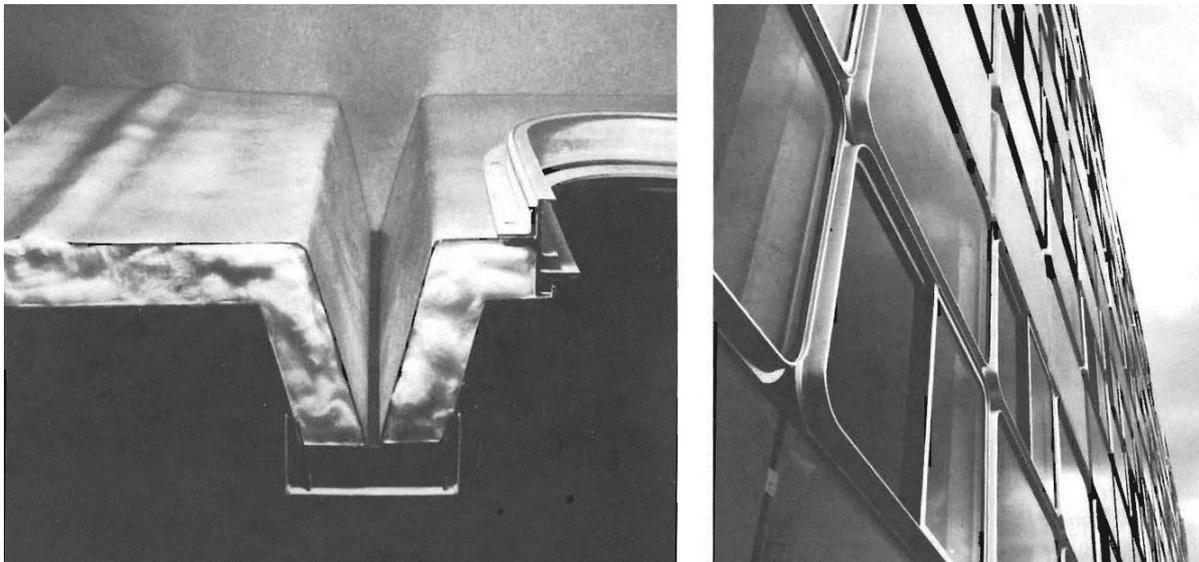
Figura 68 – Fabricação de diversos painéis metálicos de paredes



Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 12

Na primeira, vê-se dois segmentos de painéis de parede com janelas embutidas sendo usados para demonstrar o funcionamento do seu sistema de encaixe (Figura 69, esquerda). Essa avaliação comprovou o seu funcionamento que depois foi utilizado na articulação de dezenas desses painéis nas fachadas de diversas edificações (Figura 69, direita). No segundo exemplo, um protótipo semelhante é usado para avaliar a integração de diversas peças de um pilar que compunha um outro sistema de fachadas (Figura 70). Na Figura 71, é evidenciada uma seção do sistema que Prouvé desenvolveu para a fachada envidraçada da *Maison du Peuple* de Clichy, semelhante aos sistemas com perfis de alumínio usados até hoje em prédios comerciais ao redor do mundo. Percebe-se que não se trata de maquetes, pois são fabricados com os mesmos meios, materiais e tamanhos dos componentes finais. Nem são protótipos completos, pois representam apenas trechos desses componentes.

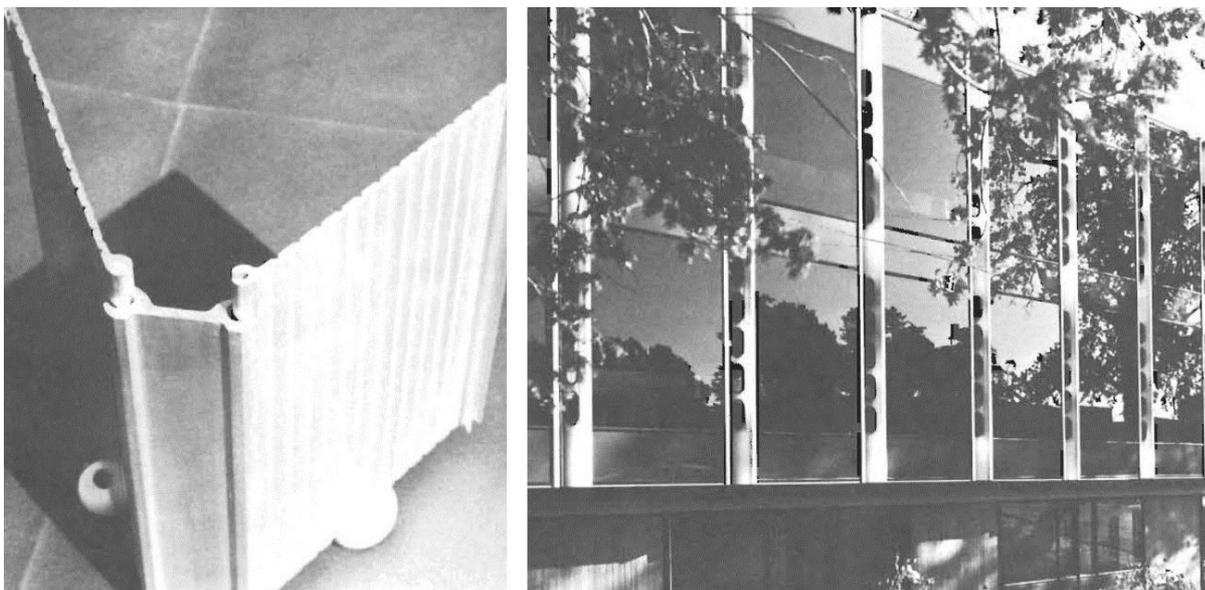
Figura 69 – Sistema de painéis de fachada utilizado nas escolas de Sarcelles, Grenoble, St- Egreve a Faverges.



Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 210

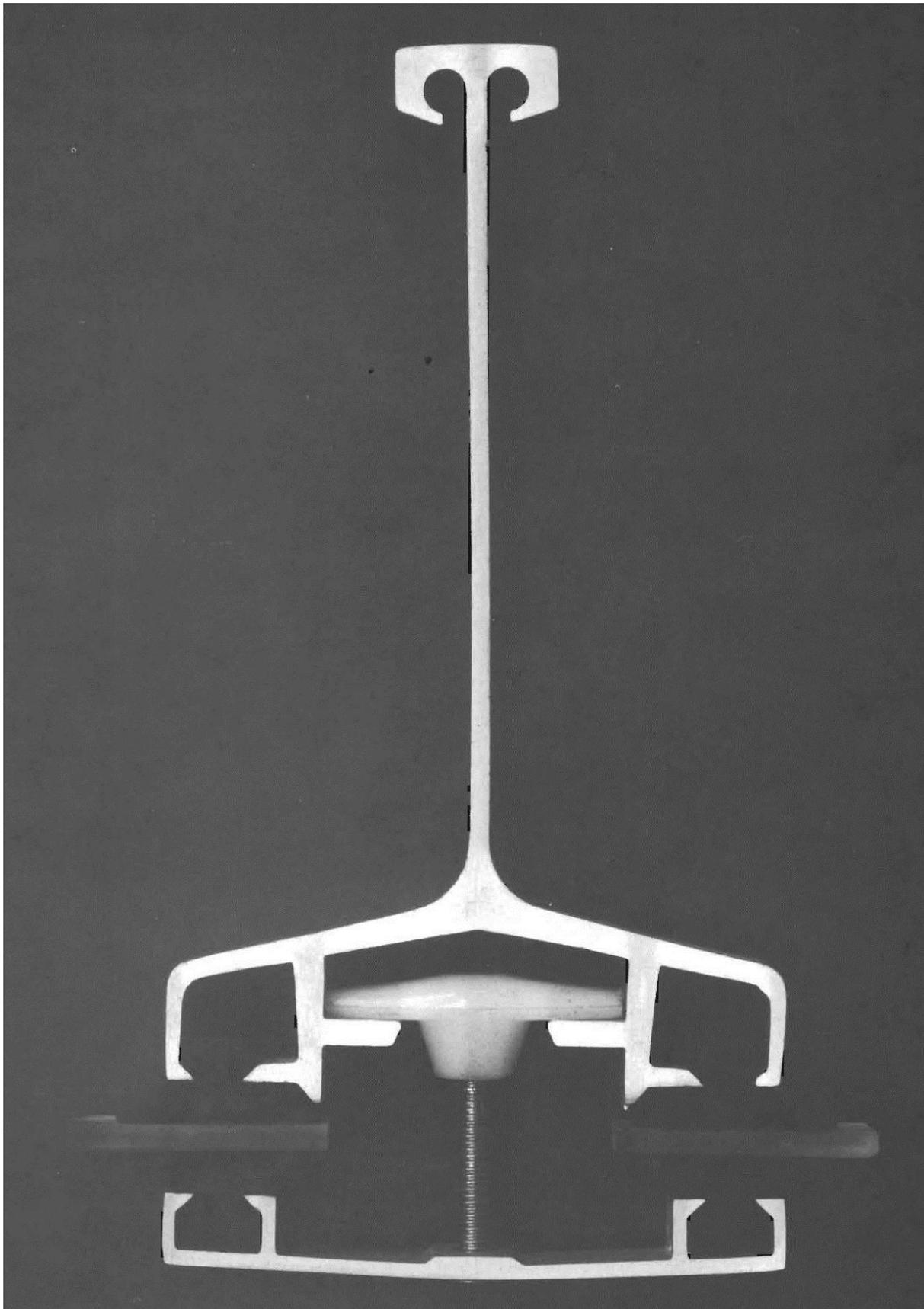
Esse tipo de representação é consideravelmente menos custoso de ser produzido do que os protótipos completos de uma construção inteira, ou mesmo de um só componente. Contudo, por ser fiel, ao componente - não é uma representação em escala e nem substitui os materiais utilizados, como acontece com maquetes – pode ser usada para avaliações empíricas, inclusive em ensaios físicos de resistência mecânica, transmissão térmica, ensaios acústicos etc.

Figura 70 – Protótipo de sistema de pilares metálicos e aplicação do sistema no Centro de Pesquisas Oceanográficas de Nantes.



Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 85

Figura 71 – Protótipo de sistema de fachada envidraçada desenvolvido para a *Maison du Peuple* de Clichy, Paris (1938-1939)



Fonte: HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 82

3.3.2 Construções excepcionais

De forma semelhante, pode se elaborar protótipos abrangentes apenas de determinados segmentos de uma construção. Isso normalmente ocorre em construções excepcionais, grandes demais para protótipos completos, mas onde há um grau significativo de incerteza sobre o projeto e os sistemas construtivos empregados. Assim, faz-se necessária alguma forma de validação empírica, como a que ocorreu no caso do edifício *Johnson Wax*, apresentado na página 104. Essa incerteza pode se dar em função do uso de alguma tecnologia ou sistema construtivo novo ou então simplesmente por ser uma obra muito complexa. Pode também ocorrer em construções muito grandes, como arranha céus, onde mesmo pequenos erros podem ser muito onerosos pelo volume de repetição de seus elementos. Nesses casos, nos quais protótipos completos são inviáveis, o desenvolvimento de um protótipo de apenas um segmento da construção se torna uma opção. Esses segmentos podem ser **reais** – um trecho que efetivamente faz parte do projeto – ou **ideais** – quando não existem de fato na construção final, sendo concebidos especificamente para a fabricação do protótipo, em geral para contemplar a maior quantidade possível de sistemas e situações complexas.

Figura 72 – Protótipo e obra completa – Centro Cultural Jean-Marie Tjibaou (Renzo Piano BW, 1998)



Figura 73 – Montagem de protótipo de arco e pavilhão completo – IBM *Travelling Exhibition Pavilion* (Renzo Piano BW, 1982-84)



Fonte: KRONENBURG, 2003, p.46-49

O arquiteto Renzo Piano, citado anteriormente, é um profissional contemporâneo reconhecido por criar edifícios inovadores e que empregam alta tecnologia. Não à toa, costuma empregar protótipos abrangentes no desenvolvimento e na validação de seus projetos. Dois deles em que usou protótipos abrangentes de segmentos reais, ou seja, de partes efetivas da construção, foram no Centro Cultural Jean-Marie Tjibaou (Figura 72) e no *IBM Travelling Exhibition Pavilion* (Figura 73). Em ambos os casos projetou sistemas estruturais leves e inovadores, que faziam uso extensivo de peças customizadas de metal ou madeira, ao invés de componentes padrão disponíveis no mercado (BUCHANAN, 2000; KRONENBURG, 2003, p. 43-49). Assim, como no caso Johnson Wax, a novidade da estrutura gerou uma incerteza sobre seu efetivo funcionamento que pôde ser dirimida através de protótipos não-completos. Foram construídos pequenos trechos dos sistemas, com suas peças a partes reais, para verificar que esses funcionariam como pretendido (Figura 72, à esquerda e Figura 73, em cima). Esse tipo de solução normalmente serve também como referência para os profissionais e empresas responsáveis pela execução final das construções. Isso foi especificamente relevante no caso do pavilhão da IBM, uma edificação móvel e que, portanto, passou por diversos processos de montagem e desmontagem ao longo de um tour de divulgação da empresa.

Na Construção Civil, nem sempre esse tipo de representação é chamado de “protótipo”. Nos EUA e Canadá, as demandas impostas pelo clima frio tornam a vedação um tema central na tecnologia da construção, na eficiência energética das edificações e na durabilidade delas. Com isso as normas impostas por órgãos governamentais e instituições certificadoras são extremamente exigentes, e têm ocasionado o crescente emprego de um dispositivo chamado de “*mock-up*” (STROIK, 2010). Na Figura 74, é exibido um *mock-up* fabricado pela construtora responsável pela obra do Campus do *Citizens Bank*, em Rhode Island, EUA, para avaliar a integração entre os diversos sistemas usados no projeto da envoltória da edificação (SUNRISE ERECTORS, 2017). Trata-se, essencialmente, de um protótipo de um trecho ideal do edifício; uma pequena construção que demonstra uma série de situações-problema típicos da obra: esquadrias, revestimentos de fechada, cobertura, fundações etc. Com esses *mock-ups* é possível realizar diversos ensaios para comprovar a eficiência do projeto em resistir às demandas físicas reais que irão se impor sobre as construções (Figura 75). Nesses países, cada vez mais se exige esse tipo de construção prévia em contratos de obras públicas ou de maior vulto, para garantir o perfeito funcionamento dos projetos e demonstrar a capacidade das construtoras em executá-los.

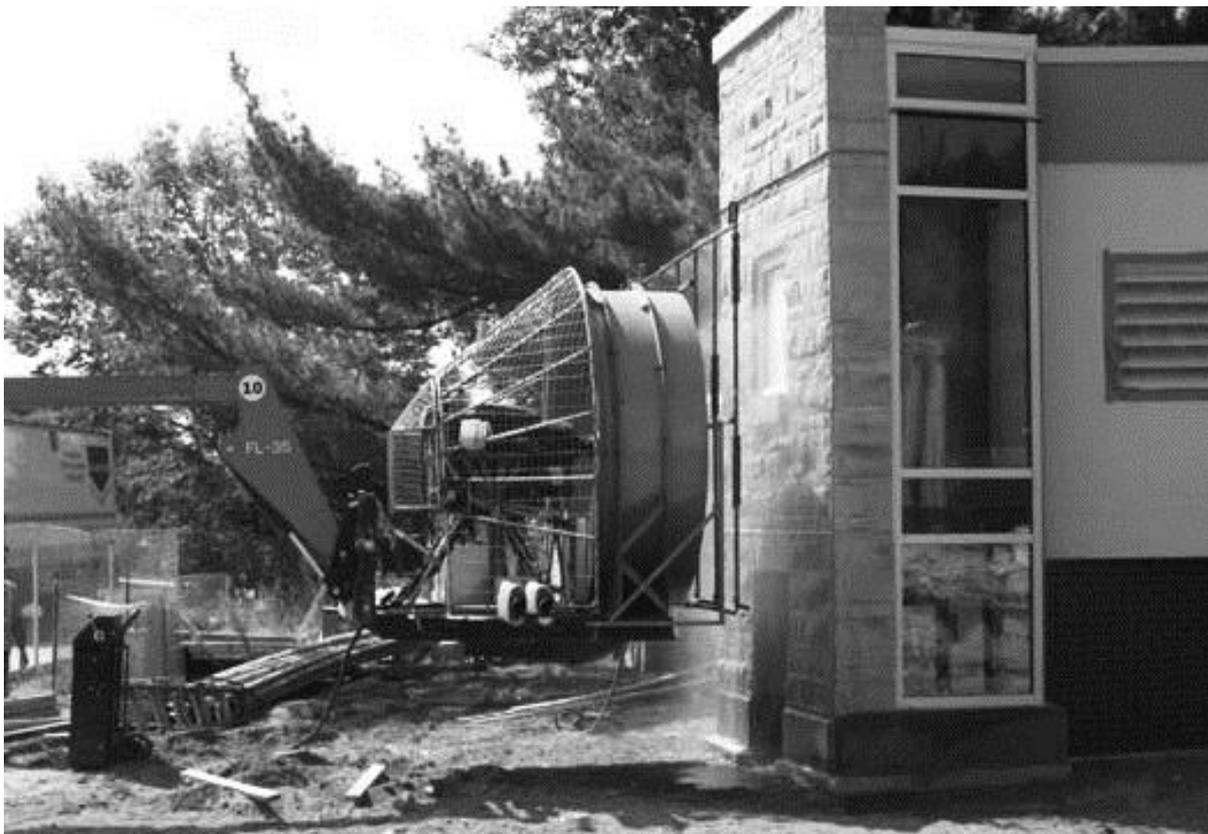
Figura 74 – *Mock-up* de envoltória – Campus do Citizens Bank (Elkus Manfredi Architects, 2017)



Fonte: SUNRISE ERECTORS. 2017.

Essa ferramenta se torna ainda mais necessária em projetos em que são utilizadas tecnologias novas ou em que tecnologias existentes são levadas ao limite. Em 2017, foi construído o edifício de estrutura de madeira mais alto do mundo, um prédio de habitação estudantil na Universidade da Columbia Britânica (UBC), no Canadá (Figura 76, esquerda). Até então o gabarito na região para construções desse tipo era de 6 pavimentos; já esse edifício tem 18. Devido à insegurança com relação ao sistema estrutural e à própria cultura da indústria norte-americana descrita anteriormente, diversos *mock-ups* foram desenvolvidos (KASBAR, 2015; CALDERÓN, 2018). Para demonstrar o funcionamento da estrutura foi construído um protótipo de um trecho ideal com dois pavimentos e onde foi testado o funcionamento dos elementos estruturais de madeira e sua integração com o núcleo de concreto das escadas e elevadores (Figura 77).

Figura 75 – Ensaio de resistência á água de um *mock-up* de uma fachada



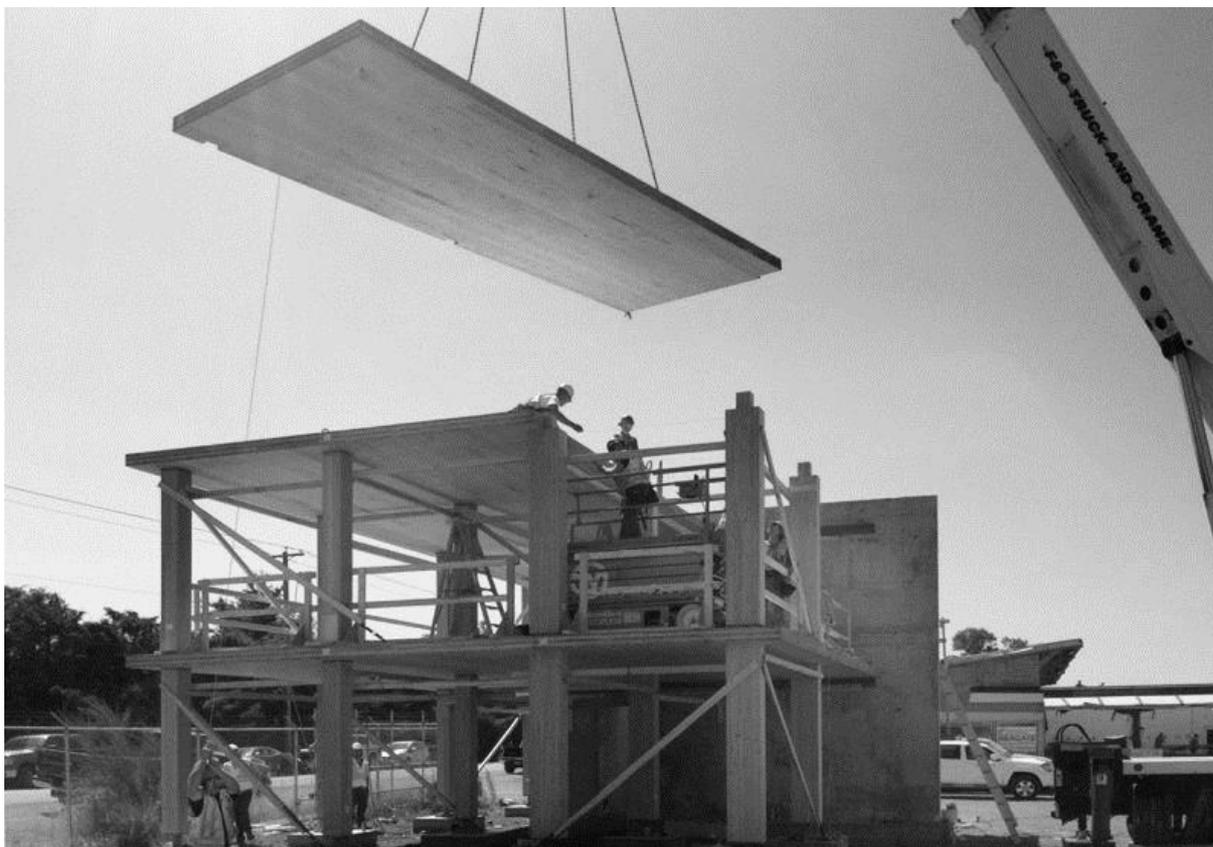
Fonte: STROIK, 2010, p.4

Figura 76 – Construção e *mock-up* de fachada – *Brock Commons* (Acton Ostry Architects, 2017)



Fonte: KASBAR, 2015, p. 32 e CALDERÓN, 2018, p. 123

Figura 77 – *Mock-up* de estrutura pré-fabricada de madeira – *Brock Commons* (Acton Ostry Architects, 2017)



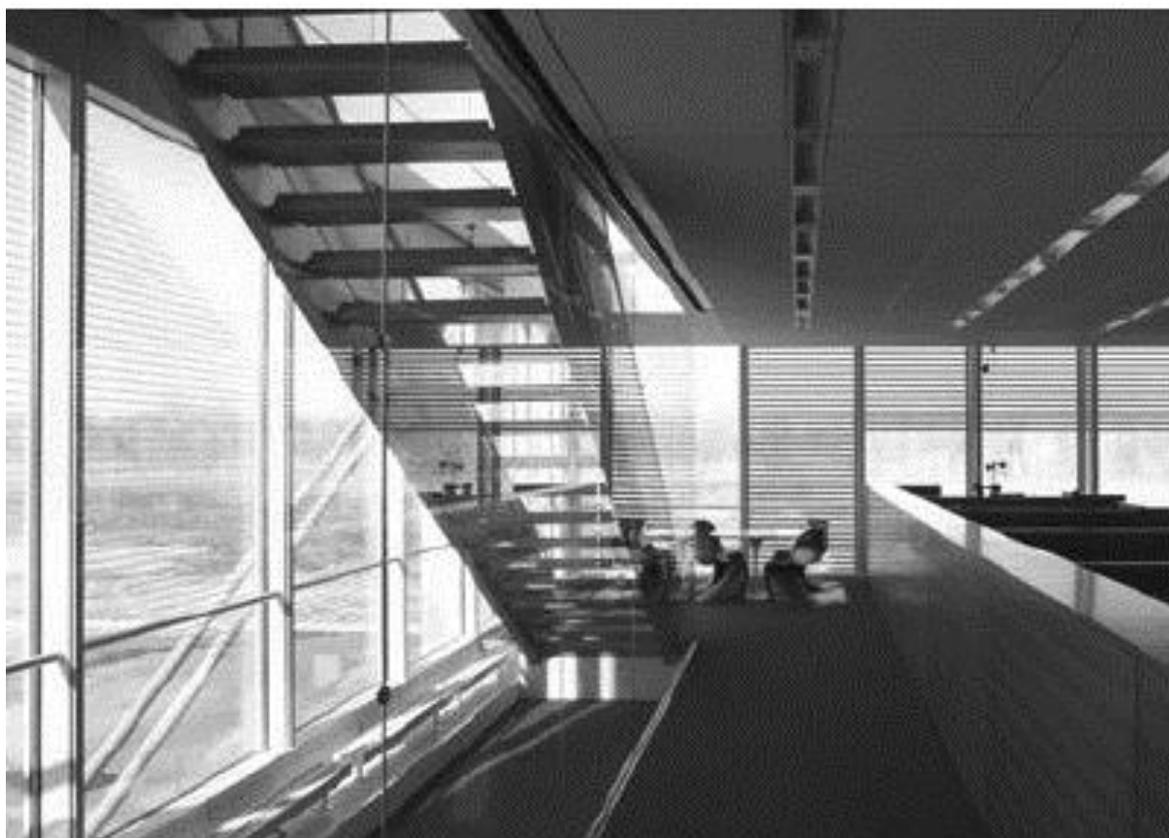
Fonte: KASBAR, 2015, p. 30

Figura 78 – *Mock-up* de parte de um pavimento – *PNC Plaza* (Gensler, 2015)



Fonte: SCHOOLY, 2015

Figura 79 – *Mock-up* de parte de um pavimento – *New York Times Building* (Renzo Piano BW, 1995-1998)



Como a edificação é razoavelmente grande e sua fachada feita de painéis pré-fabricados, esses foram também testados em um outro *mock-up* de um trecho real de fachada para testar a montagem dos painéis (Figura 76, direita).

Mock-ups também podem ser feitos de grandes segmentos reais de uma construção, como os trechos de pavimentos da *PNC Plaza* (Figura 78), projeto do escritório de arquitetura Gensler (SCHOOLY, 2015) e do edifício do *New York Times*, projeto do Renzo Piano (Figura 79). Para esse último foi construído um pavimento inteiro para realizar uma série de avaliações. Com esse protótipo, os projetistas, construtores e pesquisadores puderam verificar o funcionamento dos *brises-soleil* em conjunto com o sistema de iluminação artificial, para garantir o melhor conforto dos trabalhadores e a maior economia de energia. Avaliaram também os *layouts* de mobiliários e desenhos internos e alguns elementos estruturais como escadas e sistemas de tirantes de aço (LEE *et al*, 2005; REID, 2006).

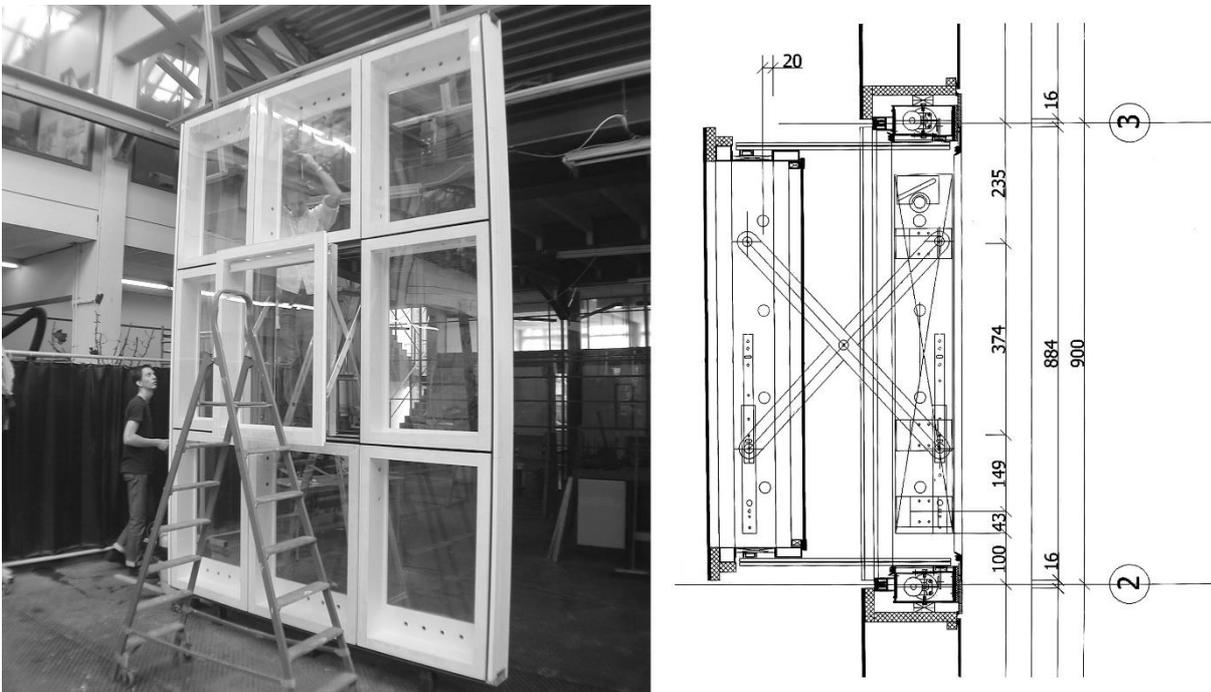
3.3.3 Fins acadêmicos

O terceiro cenário em que, aparentemente, protótipos abrangentes não-completos são desenvolvidos é o acadêmico. Nesse contexto, são usados para fins pedagógicos; auxiliando no processo de aprendizagem de alunos, principalmente no seu domínio de sistemas construtivos e estruturais e as técnicas envolvidas nesses assuntos. Nas últimas décadas, a incorporação de laboratórios de prototipagem e de disciplinas associados a eles vem crescendo nos cursos de Arquitetura e Engenharia Civil ao redor do mundo. Novamente, a terminologia empregada para descrever as atividades varia de lugar para lugar, e uso do termo “protótipo” não é corriqueiro.

A Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Delft (TU Delft), nos Países Baixos, tem um histórico de forte integração com o departamento das Ciências da Construção e em 1995 foi inaugurado o Laboratório de Desenvolvimentos de Produtos. Criado para fornecer a infraestrutura necessária à disciplina de Desenvolvimento de Produtos, encabeçada pelo arquiteto e professor Mick Eekhout (EEKHOUT, VAN SWIETEN, 2004), seu foco é no processo de projeto de componentes construtivos desde a concepção até a materialização. Com o suporte do laboratório, os alunos criam e testam protótipos em escala de real de seus projetos (Figura 80), aprendendo sobre processos construtivos e revisando suas ideias através de um processo repetitivo de concepção e avaliação pautado pela realidade material.

Inspirado na metodologia de projeto proposta por Eekels e Roozenburg (1995), também da TU Delft, a disciplina segue um processo projetual composto por círculos iterativos de análise do problema, síntese de soluções de subcomponentes, síntese dos produtos completos e avaliação dos designs, sempre através da prototipagem em laboratório. Utilizam protótipos físicos, em escala real ou levemente reduzida (1/5 ou 1/10), para a concepção de projetos, a avaliação de seu funcionamento e em avaliações mercadológicas com potenciais clientes. Durante o curso, inclusive, os alunos são incentivados a perseguirem a obtenção de patentes dos produtos que desenvolvem.

Figura 80 – Protótipo de parede cortina com janelas de abertura pantográfica, desenvolvido por alunos do Laboratório de Desenvolvimento de Produtos – TU Delft



Fonte: EEKHOUT, VAN SWIETEN, 2004, p. 8

O objetivo final declarado com esse modelo de ensino é o de resistir à tendência atual entre arquitetos, estudantes de arquitetura e centros de ensino de enfatizarem apenas aspectos conceituais e a produção gráfica da arquitetura, sem atuar na materialização das ideias. Para Eekhout e Van Swieten, o atual cenário incentiva a “erosão da prática arquitetônica e do papel central do arquiteto nos processos construtivos, derivado do papel histórico do ‘Mestre Construtor’” (EEKHOUT, VAN SWIETEN, 2004, p. 3).

Um fenômeno muito semelhante nos Estados Unidos e no Canadá, é o surgimento de cursos “*design-build*”. Esse termo é usado tanto para descrever

empresas que atuam no desenvolvimento de projetos e na execução de obras, quanto um tipo de curso similar ao da TU Delft. Enquanto modalidade profissional, o *design-build* é um modelo contratual para a Construção onde há uma só entidade responsável pelo desenvolvimento de projetos e a execução das obras. Esse modelo tem crescido significativamente nos últimos anos e é atualmente a principal forma de contratação para construção nos EUA (FMI, DBIA, 2018). No ensino, disciplinas no formato *design-build* são aquelas em que os alunos projetam pequenas construções para um local determinado e depois eles mesmo a constroem, dentro do período das aulas (Figura 81).

Figura 81 – Alunos em um curso *design-build* da UBC



Fonte: Blair Satterfield

Esse tipo de ensino, na América do Norte, traça suas raízes aos cursos da Escola de Arquitetura de Taliesin, fundado por Frank Lloyd Wright nos anos 30 e ao *Rural Studio*, fundado por Samuel Mockbee, no início dos anos 1990. Na sede da Taliesin no Arizona, os alunos do último ano de formação projetam e constroem uma pequena habitação dentro do campus da escola (Figura 82). Depois eles vivem nelas por um tempo e então formulam alterações sobre o projeto original, a partir das observações que fazem após esse processo (SOAT, 2018).

Figura 82 – O aluno Conor Denison construindo seu abrigo na Escola de Arquitetura de Taliesin



Fonte: SOAT, 2019.

Já no *Rural Studio*, da Universidade de Auburn, no Alabama, turmas inteiras de alunos participam do projeto e construção de equipamentos comunitários e casas para famílias pobres na da região (Figura 83). Através desse processo, não só aprendem sobre as Ciências da Construção através da prática executiva, como ao fim fazem uma contribuição social à comunidade na qual se inserem (DEAN, 2002; LOTUFO 2014). Nesse caso, as construções são ao mesmo tempo protótipos, no sentido de que servem para a aprendizagem dos alunos sobre os problemas de projeto (LAUFF, KOTYS-SCHWARTZ, RENTSCHLER, 2018); e, também, produtos finais para as famílias e comunidades para a quem são entregues.

No Brasil, cursos e laboratórios semelhantes são designados “canteiros experimentais”, que, assim como o laboratório da TU Delft, são espaços laboratoriais cuja função é dar subsídios para o desenvolvimento de aulas de técnicas construtivas baseadas na prática executiva. A partir da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional de 1996, esse tipo de laboratório passou a ser equipamento obrigatório nas faculdades de arquitetura e urbanismo, contudo sua origem é mais antiga (RONCONI, 2005). Já em 1976, os professores Victor Lotufo e Eduardo Lins de Melo desenvolveram, em uma disciplina de projeto da Faculdade Farias Brito, em Guarulhos, SP, uma série de “maquetes” na escala 1/1. Três anos mais tarde, em experiência semelhante os professores Yopanan Rebello e Maria Amélia Leite, incorporaram o desenvolvimento de protótipos em escala real nas suas disciplinas de sistemas estruturais da Faculdade de Belas Artes (LOTUFO, 2014, p.49-77).

Figura 83 – Alunos do *Rural Studio* construindo uma casa para uma família local



Fonte: LOTUFO, 2014, p. 125

Figura 84 – Alunos construindo protótipos no canteiro experimental da PUC de Campinas



Fonte: LOTUFO, 2014, p. 53

Figura 85 – Edificação de taipa construída no canteiro experimental da UFMS



Fonte: MILANI, Ana Paula. Construção de Taipa na UFMS – Canteiro Experimental. 25 fevereiro 2019. Disponível em: <ppgees.ufms.br/construcao-de-taipa-na-ufms-canteiro-experimental>. Acesso em: junho 2019.

Em 1990, Victor Lotufo, junto com o professor João Marcos de Almeida Lopes, voltaria a aplicar esse método nos cursos de sistemas estruturais da PUC de Campinas (Figura 84). Em 1993, é inaugurada a prática do canteiro no curso de arquitetura da Faculdade de Arquitetura da USP, pelos professores Antônio Battaglia, Elisabetta Romano e Erika Yoshioko e dois anos depois ganharia um espaço próprio por contribuição do professor Reginaldo Ranconi (LOTUFO, 2014, p.54-56). A partir do canteiro experimental da USP, o modelo se espalhou por diversas escolas de arquitetura do país (Figura 85).

Figura 86 – Alunos desenvolvendo exercícios nas disciplinas de canteiro experimental na FAU-USP



Fonte: RONCONI, 2005.

Com o canteiro experimental, o principal objetivo não é atingir alguma construção em si, mas sim a aprendizagem dos alunos que se dá através do processo de concepção e construção dela. Nesse sentido se diferencia tanto do canteiro de obras, cujo objetivo é somente a execução, quanto do tradicional laboratório de pesquisas analíticas, onde se realiza experimentos puramente materiais. O canteiro experimental é, justamente, para experimentar; para testar ideias e aprender a projetar em uma prática empírica. O propósito dele não é a busca de uma eficiência pré-estabelecida, como no canteiro de obras típico, mas sim permitir a divagação e exploração que leva às inovações. Um laboratório de projeto onde a exploração de ideias se dá através de construções reais, ou então protótipos abrangentes não-completos. Ou seja, faz uso da prototipagem como modo dos alunos aprenderem sobre aquele projeto em específico e o processo projetual em geral. Para Ronconi, esse aspecto é central à proposta, que necessariamente envolve uma articulação com o plano pedagógico do curso como um todo, devendo acompanhar as outras disciplinas do currículo (2005, p. 142-143).

O canteiro experimental da USP é associado a três disciplinas da grade regular do curso de arquitetura e a uma disciplina optativa. Na primeira os alunos desenvolvem pequenos modelos de gesso, com o objetivo de serem apresentados a técnicas construtivas e ao comportamento dos materiais. Esses modelos são levados a ensaios de ruptura no canteiro (Figura 86, canto inferior direito). No segundo curso, escolhem uma técnica dentre várias e desenvolvem protótipos maiores e mais complexos (Figura 86, topo na esquerda e direita). No terceiro, já desenvolvem pequenas construções adentráveis, empregando o uso de formas, prumos e outras ferramentas típicas da Construção Civil (Figura 86, canto inferior esquerdo). Já a disciplina optativa é oferecida a alunos em final de curso e tem uma característica mais livre, sendo o tema definido pelos alunos e desenvolvido pela turma toda em conjunto (RONCONI, 2005).

Certamente existem ainda diversos outros casos em que foram fabricados protótipos de construções em situações acadêmicas, mas não designados pelos termos “canteiro experimental” ou “*design-build*”. Em um exemplo de 2015, foi executado um protótipos completo como parte do trabalho final de graduação de uma estudante de arquitetura e pesquisadora do Laboratório de Modelos e Fabricação Digital da UFRJ (Figura 87). Nesse caso, o objetivo era demonstrar a aplicação de métodos de produção automatizadas na fabricação de uma unidade habitacional

mínima. Para tanto foi efetivamente construído um protótipo completo da unidade através dos equipamentos do laboratório e com o auxílio de diversos alunos. Dessa forma, o projeto pôde ser avaliado a um nível de profundidade incomum para trabalhos acadêmicos e todos os alunos envolvidos puderam adquirir conhecimentos sobre os processos de fabricação envolvidos.

Figura 87 – Construção de protótipo - Casa Revista (Clarice Rohde, Laboratório de Modelos e Fabricação Digital - UFRJ, 2015)



Fonte: PASSARO, ROHDE, 2016, p. 35

Apesar de não ser amplamente reconhecido como educador, Jean Prouvé não deixou de fazer considerações a respeito de como os cursos de arquitetura deveriam incorporar a experiência construtiva nos seus currículos:

Quando o arquiteto [estudante] tiver feito sua escolha, ele tem de construir imediatamente na faculdade, que terá sido transformada em uma fábrica ou oficina. Sem mais anos de desenho sem propósito: a construção deve começar aos dezoito; deve-se usar técnicas avançadas e reunir arquitetos, engenheiros, economistas e sociólogos nas mesmas faculdades. Eles irão todos se encontrar novamente no futuro.

Quando concluí seu treinamento em sua faculdade especializada, o arquiteto de hoje já está removido do seu trabalho e, ademais, ganha sua vida desenhando linhas para seus superiores, que são igualmente alienados. [...] O pensador construtivo que não tem mais controle absoluto sobre a técnica perde seu chão. Seus gestos finos se tornam apenas teatrais. (HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 173. Tradução nossa)

CONCLUSÕES

Nesta seção final, é apresentada uma síntese dos conteúdos abordados em toda a dissertação e uma avaliação da sua relevância. Em especial, foca-se sobre os novos dados que esta pesquisa traz em contribuição ao estudo de metodologias projetuais na Construção Civil, através da prototipagem. Ademais, são apontados o significado acadêmico desta pesquisa, de que forma se situa dentre outros trabalhos, suas limitações, e ainda, são delineadas possíveis novas frentes de estudo.

Síntese da pesquisa

Para esta dissertação foi realizada uma Revisão Sistemática de Literatura com a qual se buscou abordar as seguintes questões de pesquisa:

O que são “protótipos”? Como a “prototipagem” é empregada em processos projetuais, em geral, e na Construção Civil em específico? Qual a relevância dela para esses processos e de que forma difere de outras técnicas projetuais da Construção?

Após um período de buscas iniciais chegou-se à constatação de que não há, atualmente, bases teóricas firmemente estabelecidas na Construção Civil para responder essas questões. Ao mesmo tempo, partiu-se para o levantamento e a análise de diversas referências bibliográficas de outros campos de conhecimento, e assim foi reunido um conjunto de artigos e livros de autores da Engenharia Mecânica e de Materiais, Desenho Industrial e Ciências da Computação que se julgou serem as referências mais pertinentes para a pesquisa.

Em indústrias onde se faz uso extensivo de protótipos de alta fidelidade no desenvolvimento de produtos, tais como as enunciadas acima, é comum observar a palavra “protótipo” expandir seu significado para abarcar toda e qualquer representação projetual. Os autores estudados propõem uma série de definições e conceituações para a prototipagem, compilados de forma sintética na Tabela 4.

Tabela 4 – Definições e conceituações da prototipagem

Autores	Área	Definição de Protótipo	Enfoque	Principal Conceito Teórico
Chartier e Badev (2013)	Eng. de Materiais	“...são criados para materializar a conceptualização de um projeto”	Tipos de protótipos	Cinco tipos gerais
Ulrich e Eppinger (1995)	Eng. Mecânica	“...são uma aproximação de um produto ao longo de uma ou mais dimensões de interesse.”	Características dos protótipos	Focado / Abrangente Físico / Abstrato
Houde e Hill (1997)	HCI* e Desenho Industrial	“...são qualquer representação de uma ideia projetual, independentemente de seu veículo”	O que protótipos buscam representar	Implementação, Papel e Aparência e Manuseio
Lim, Stolerman e Tenenberg (2008)	HCI* e Desenho Industrial	“...são filtros que atravessam um espaço projetual e são manifestações de ideias projetuais que concretizam e externalizam ideias conceituais.”	O que são protótipos	Filtros e Manifestações de Ideias
Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler (2018)	Eng. Mecânica e Biomédica	“...é a incorporação física ou digital dos elementos críticos do projeto pretendido, e, também, uma ferramenta iterativa para elevar a comunicação, possibilitar a aprendizagem, e informar a tomada de decisões em qualquer ponto do processo projetual.”	Papéis dos protótipos em projetos	Aprendizagem, Comunicação, e Tomada de Decisões

*HCI (*Human-Computer Interaction*) é um subcampo das Ciências da Computação

Fonte: elaboração própria

Percebe-se que, de um modo geral, consideram que todas as formas de representação de projeto, ou seja, qualquer artefato usado como símbolo ou imagem em analogia ao objeto projetado, pode ser designado como um "protótipo". Entende-se que essa abordagem tem seus méritos, mas que para trazê-la para a Construção Civil, onde já existe uma histórica cultura projetual com nomenclaturas e termos próprios que estão há muito consolidados, é necessário fazê-lo de forma cuidadosa e crítica. Por isso, decidiu-se por não designar todas as representações como "protótipos", mas somente aquelas que se aproximam ao significado original do termo, de forma condizente com os entendimentos vigentes dessa indústria.

A palavra "protótipo" deriva da junção dos termos em grego *prôtos* - "primeiro" ou "original" - e *týpos* - "tipo"; logo seu significado literal é "primeiro tipo" ou "tipo original". Segundo a definição do dicionário Michaelis (PROTÓTIPO, 2020), equivale ao "primeiro tipo; primeiro exemplar; modelo, padrão" ou, então, ao "primeiro exemplar de um produto industrial, feito de maneira artesanal, conforme discriminações de um projeto, que serve de teste, antes de sua produção em série". Já em inglês, segundo o dicionário Webster (PROTOYPE, 2020, tradução nossa), a palavra "*prototype*" significa "um modelo original a partir do qual algo é padronizado" ou "a primeira forma, em escala real e normalmente funcional, de um novo tipo ou projeto de uma construção". Protótipos são geralmente entendidos como sendo a primeira cópia de algo que será reproduzido diversas vezes e, portanto, devem necessariamente ser iguais, ou ao menos muito similares, aos produtos que representam.

Essa definição corresponde a tipos de representação pouco utilizados na Construção Civil, mas muito comuns em indústrias seriadas, e que aqui configuram o interesse central de estudo: as representações de alta fidelidade. Inclusive, acredita-se que o esparsos uso dessas formas de representação na Construção é uma das razões pelas quais essa indústria atualmente apresenta poucos estudos e uma geral falta de clareza teórica sobre elas.

Em diversos segmentos produtivos, o desenvolvimento de novos produtos é feito em grande parte através da criação e manipulação de representações de projeto. Essas representações **manifestam ideias projetuais** (LIM, STOLERMAN, TENENBERG, 2008) que, sendo materializadas de diversas formas, facilitam a **exploração** dos problemas abordados, ao possibilitar que se estabeleça uma "**conversa reflexiva**" entre projetistas e a situação de projeto (SCHÖN, 1983 p. 76-104). Através de representações, projetistas gradativamente passam a entender

melhor o seu projeto, **gerando** soluções e depois **avaliando** e **revisando-as** em um **ciclo iterativo e interativo** de manipulação do binômio **problema-solução** (CROSS, 2000, p.9-11, 2006, p. 80; DORST, CROSS, 2001; SCHÖN, 1983, p. 49-69; RITTEL, 1988; RITTEL, WEBBER, 1973). Essa manipulação ocorre através da constante reelaboração das representações, que hora **filtram** um ou outro aspecto do projeto (LIM, STOLERMAN, TENENBERG, 2008). Dessa forma, projetistas podem **enquadrar** e reenquadrar (SCHÖN, 1983, p.40-63; DORST, 2011) o problema abordado de modo que consigam **focar** sobre os aspectos relevantes àquele momento de análise (ULRICH, EPPINGER, 2012).

Ao longo do processo projetual, **aprendem** cada vez mais sobre o problema abordado e assim conseguem desenvolver e avaliar ideias e proposições antes se comprometer a elas e, eventualmente, executá-las. As representações de projeto também **auxiliam na comunicação** de ideias entre projetistas e outros atores interessados - clientes, usuários, instituições, fabricantes etc. Além de desempenhar os papéis de **facilitar a aprendizagem** sobre a natureza de um problema e **auxiliar na comunicação** entre diversos atores, as representações ainda viabilizam a **tomada de decisões** sobre um projeto, possibilitando que esse evolua rumo à sua conclusão (LAUFF, KOTYS-SCHWARTZ, RENTSCHLER, 2018). Ao fim, quando se chega a uma solução considerada adequada, também servem para comunicar o projeto aos responsáveis pela execução (CROSS, 2000, p.4-6).

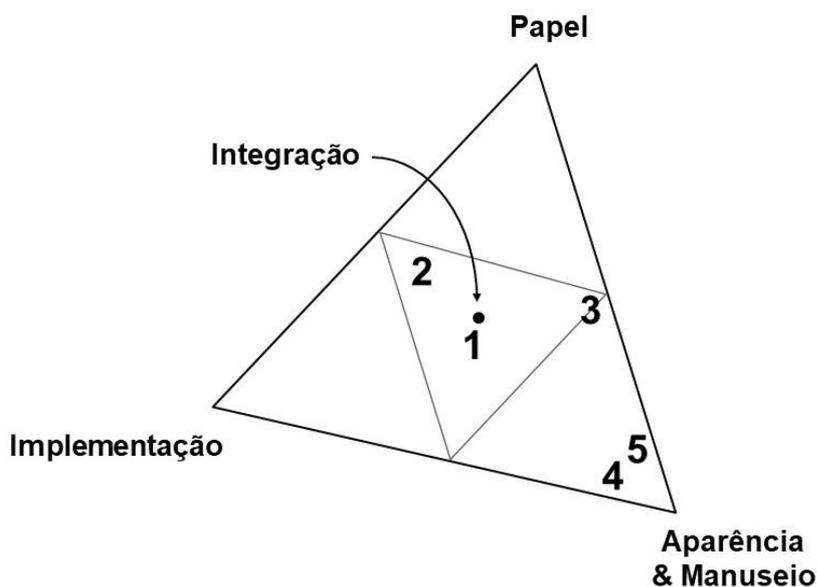
As representações podem ser categorizadas em função de diversas características que apresentam. Houde e Hill (1997), classificam-nas em função de quais são os aspectos do produto alvo que elas melhor representam, dentre três possíveis: seu **papel** - para que serve aquele produto-; sua **aparência e manuseio** - como se parece e como é ao toque - ou sua **implementação** - como é efetivamente posto em prática. Quando representam todos os três aspectos ao mesmo tempo, acabam por também abordar a **integração** de todas as partes do produto, o equivalente à definição literal de um protótipo.

Já Chartier e Badev (2013) enumeram uma série de categorias gerais de representações: o **protótipo funcional** - cópia plenamente funcional ou completa de um produto-; de **prova-de-conceito** - que demonstra que esse funcionará como esperado-; de **experiência-do-usuário** - usado para avaliar a interação dele com usuários-, **visual** - que emula a aparência do produto - e de **estuda-da-forma** - usado para especular sobre possíveis geometrias. Essas categorias brandas correspondem

a designações comumente empregadas nas indústrias e que também são usadas, de uma forma ou de outra, pelos demais autores estudados.

No Gráfico 22, pode-se observar como os tipos gerais de Chartier e Badev poderiam ser classificados segundo o modelo de Houde e Hill. Protótipos funcionais (1) são equivalentes aos protótipos abrangentes de Ulrich e Eppinger, aos protótipos de integração, de Houde e Hill e representam todos os três aspectos ao mesmo tempo. Protótipos de prova-de-conceito (2) abordam principalmente a implementação e o papel do produto, demonstrando que efetivamente funciona e atende ao seu propósito. Protótipos de experiência-do-usuário (3) focam sobre a aparência e manuseio e o papel de um produto, demonstrando que servirá às necessidades dos usuários. Protótipos visuais (4) representam única e exclusivamente a aparência e manuseio de um produto para a comunicação a terceiros. Protótipos de estudo-da-forma (5) também focam sobre a aparência e manuseio do produto, porém de forma exploratória ao invés de apenas demonstrativa.

Gráfico 22 – Sistema de classificação de Houde e Hill e tipos gerais de protótipos de Chartier e Badev



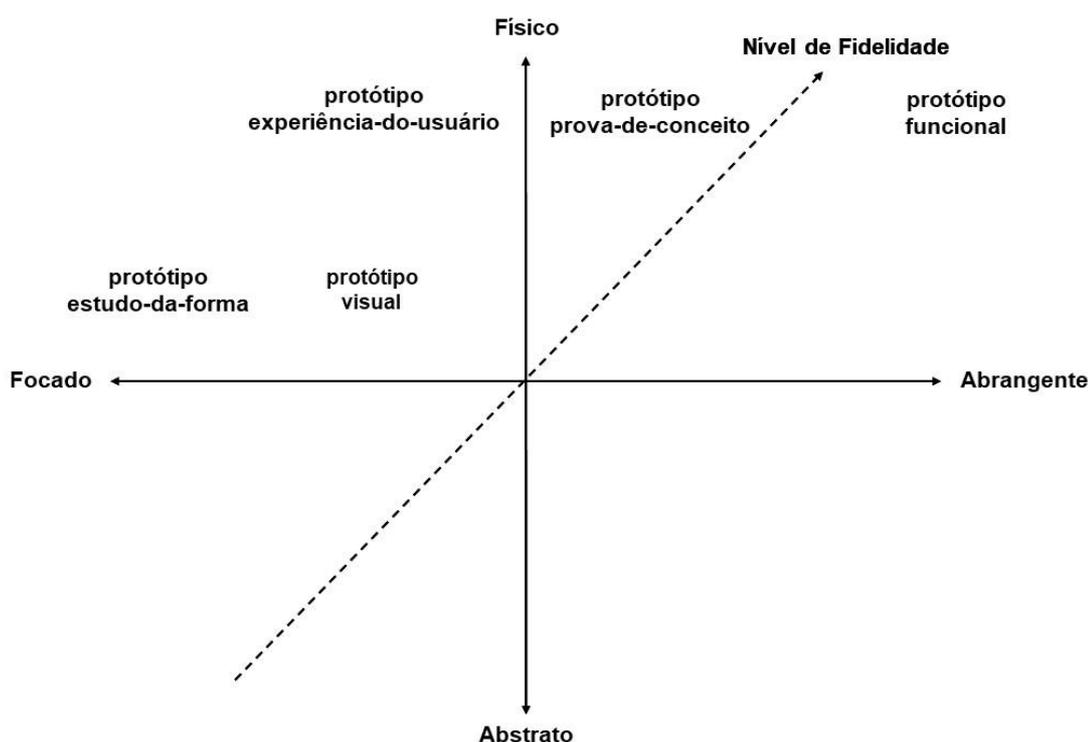
Fonte: elaboração própria

Percebe-se que esses dois últimos são indistinguíveis na classificação de Houde e Hill, pois as qualidades que os diferem não são contempladas nesse modelo. Segundo os conceitos de Lauff, Kotys-Schwartz e Rentschler, poderíamos afirmar que essa diferença reside nos papéis que desempenham: protótipos visuais servem principalmente para possibilitar a comunicação de ideias projetuais, enquanto

protótipos de estudo-da-forma são usados para auxiliar na aprendizagem sobre a situação de projeto. De forma parecida, usando o modelo simplificado de processos projetuais de Nigel Cross (Gráfico 24), poderíamos afirmar que os primeiros são usados mais nas etapas de comunicação e os últimos nas de exploração e geração de soluções.

Ulrich e Eppinger (2012), por sua vez, propõem um sistema de categorização em torno de duas dimensões: o quão **físico** ou **abstrato** e o quão **focado** ou **abrangente** as representações são. Se focam apenas sobre aspectos específicos de um projeto, são focados, mas se representam a totalidade dele são abrangentes. Se são materializações físicas e concretas ou então representações abstratas, como desenhos e modelos digitais (Gráfico 23).

Gráfico 23 – Sistema de classificação de Ulrich e Eppinger com tipos gerais de Chartier e Badev

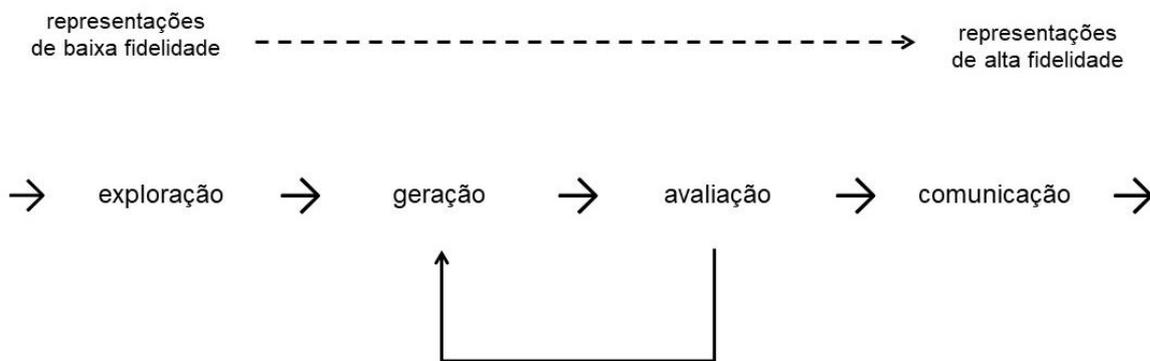


Fonte: elaboração própria

Essa noção de que representações podem ser "**focadas**" em aspectos de projeto específicos é muito semelhante ao conceito de "**filtro**", de Lim, Stolerman e Tenenmberg, e também à ideia de "**enquadramento**" (em inglês, "*frame*" ou "*framing*"), proposta por Donald Schön em 1983 no seu livro seminal *The Reflective Practitioner*, e muito utilizada na literatura do Desenho Industrial desde então.

Segundo Dorst (2011, p. 522-525), é através do enquadramento que projetistas simplificam **problemas abertos** - aqueles onde há variáveis de análise demais - transformando-os em **problemas fechados**, e assim viabilizam a proposição de soluções. Ou seja, reduzem as dimensões consideradas para tratar apenas daquilo que importa naquela etapa do projeto. Essa é uma técnica essencial, empregada em momentos conjecturais do desenvolvimento de projetos, que auxilia na exploração do problema e na geração ou descoberta de soluções.

Gráfico 24 – O nível de fidelidade das representações tende a aumentar ao longo das etapas dos processos projetuais

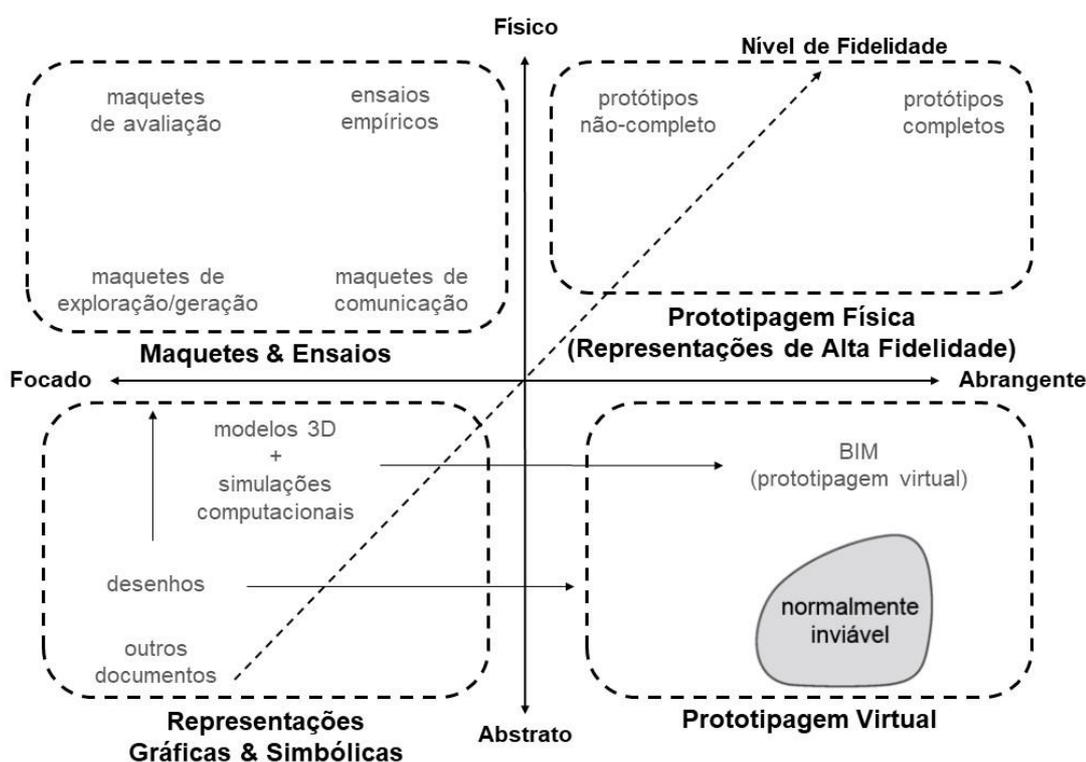


Fonte: elaboração própria (adaptado de CROSS, 2000, p. 30)

Outro critério de classificação usado pela maioria dos autores estudados, de forma explícita ou implícita, é o **nível de fidelidade**. Através dessa qualidade, se define o quão próximo uma representação se assemelha à realidade do produto a que representa. Representações de alta fidelidade se aproximam à cópia exata de um produto, enquanto as de baixa fidelidade são mais simbólicas. Ao longo de processos projetuais, projetistas desenvolvem representações de variados níveis de fidelidade conforme os aspectos sobre os quais estão focando a cada momento. De um modo geral, as representações de baixa fidelidade, que são mais facilmente manipuladas e reformuladas, tendem a ser mais utilizadas nas etapas iniciais dos projetos, onde servem para **explorar** os problemas abordados e **gerar** soluções (CROSS, 2000, p.4-6, p.30; ULRICH, EPPINGER, 2012). Já as de alta fidelidade, que costumam ser mais custosas, porém representam os produtos de forma mais completa, são as melhores para as etapas posteriores de **avaliação** e **comunicação** das soluções propostas (Gráfico 24).

Na classificação de Houde e Hill, o nível de fidelidade é maior nas representações que se situam mais acerca do centro do gráfico triangular, ou seja, mais próximos à integração. Já no modelo de Ulrich e Eppinger o nível de fidelidade é maior nas representações físicas e abrangentes e menor nas abstratas e focadas. A fidelidade pode inclusive ser considerada um terceiro eixo desse modelo, como demonstrado nos Gráfico 23 e Gráfico 25, onde são mapeados os tipos de protótipos de Chartier e Badev e as formas de representação na Construção Civil, respectivamente.

Gráfico 25 – Sistema de classificação de Ulrich e Eppinger, com representações da Construção Civil agrupadas em categorias gerais



Fonte: elaboração própria

As representações **focadas**, sejam elas **físicas** - maquetes e ensaios - ou **abstratas** - representações gráficas e simbólicas -, são, de um modo geral, as ferramentas projetuais tradicionais e históricas da Construção Civil. Existem há milênios e chegam a configurar uma espécie de arquétipo do modo de trabalhar nessa indústria. Já as representações **abstratas e abrangentes** - os modelos de informação da construção, ou “prototipagem virtual” - configuram um campo emergente e são,

hoje, o principal meio de se representar construções de um modo abrangente e possivelmente o que recebe mais atenção por parte de estudos acadêmicos.

A “prototipagem rápida”, expressão muito encontrada em estudos sobre a prototipagem na Construção Civil, por sua vez, se refere apenas ao uso de **métodos de produção automatizados** – impressão 3D, fresadores CNC, cortadoras a laser etc. – na fabricação de protótipos ou maquetes (PUPO, CELANI, DUARTE, 2009, p.439-441). Não se trata de uma categoria fundamentalmente nova de representações, pois não representa algum aspecto diferente no processo projetual. Ao invés, otimiza e agiliza a produção de modelos, protótipos e, até mesmo, componentes finais através do uso de novas tecnologias fabris.

Por fim, as representações **físicas e abrangentes** - de alta fidelidade - são justamente aquelas que poderíamos chamar de "protótipos" e configuram o principal foco de interesse desta pesquisa. Podem ser agrupadas em duas subcategorias: os **protótipos completos** - cópias exatas de uma construção inteira - e os **protótipos não-completos** - aqueles que representam apenas determinados componentes ou então segmentos de uma construção. Os primeiros aparentam ser empregados apenas no desenvolvimento de construções pré-fabricadas pequenas. Já os não-completos são utilizados em projetos de construções maiores e mais complexas, situação em que protótipos completos se tornam inviáveis; ou então, para fins acadêmicos em processos de ensino.

Colocadas todas essas questões, propõe-se a seguinte definição de protótipos, no contexto da Construção Civil:

Protótipos são representações projetuais de alta fidelidade, físicas e abrangentes. Representam um segmento significativo ou a totalidade de uma construção projetada em escala real, ou próxima do real; e contemplam toda sua complexidade, incorporando todos os elementos, componentes e sistemas relevantes, com suas relações concretas e materiais originais em pleno funcionamento.

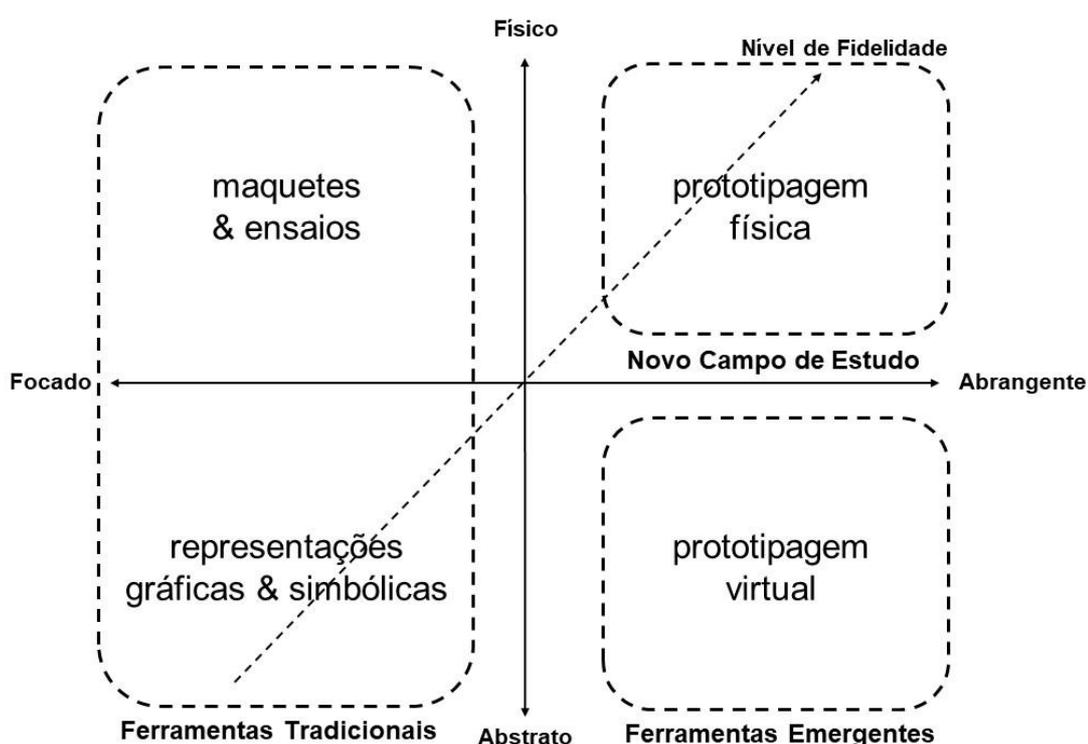
São "representações" porque não são o próprio produto que se busca desenvolver, mas sim um modo de manifestar ideias de seu projeto ainda em desenvolvimento, mesmo que em etapas finais. São de "alta fidelidade" no sentido que são representações iguais, ou muito semelhantes, ao produto final que emulam; são "físicas" porque feitas dos mesmos materiais que o produto e "abrangentes" porque representam o produto em toda sua complexidade e não apenas um ou outro aspecto dele.

Esses protótipos de alta fidelidade são efetivamente utilizados na Construção Civil, porém são raros e pouco estudados. Apresentam determinadas vantagens únicas sobre outros modos de representação e por isso seu estudo é relevante.

Relevância

Na Construção Civil, tradicionalmente se utiliza as representações gráficas/simbólicas e as maquetes/ensaios no desenvolvimento de projetos. Nas últimas décadas, o emprego de modelos digitais – a prototipagem virtual – vem crescendo, assim como o seu estudo em pesquisas acadêmicas. Já a prototipagem física permanece sendo pouco empregada, estudada ou mesmo compreendida. Acredita-se que isso se deve às características da indústria, notadamente sua natureza *in loco* e a usual singularidade de seus produtos, que tornam a prototipagem de alta fidelidade economicamente onerosa. Adotada por profissionais de exceção, no mínimo desde meados do século XX, essa abordagem auxilia no desenvolvimento de projetos e tecnologias inovadoras, e por vezes disruptivas. Contudo, configura, até hoje, um campo de estudo relativamente pouco explorado (Gráfico 26).

Gráfico 26 – Prototipagem física: campo de estudo ainda pouco explorado



Dado isso, a seguinte questão vem à tona: se a prototipagem física é muito onerosa, e por isso pouco empregada na Construção, por que então estudá-la?

Protótipos físicos abrangente são os mais efetivos enquanto ferramentas de **integração**, porque exigem a montagem e interconexão física de todas as partes e subcomponentes que fazem parte de um produto. Ao fazê-lo o protótipo obriga a coordenação entre diferentes membros da equipe de desenvolvimento do produto. Se a combinação de quaisquer componentes do produto interfere com sua função, o problema pode ser detectado através da integração física em um protótipo abrangente. (ULRICH, EPPINGER, 2012, p.295-296. Tradução e grifo nosso)

A principal vantagem da prototipagem, enquanto abordagem projetual, é que ela permite um nível de avaliação e compreensão das soluções propostas que nenhuma outra forma de representação oferece. Sobre protótipos, podem ser feitas análises e ensaios de maior profundidade do que sobre outras formas de representação. Também, o processo de desenvolvê-los obriga os projetistas a considerarem diversos aspectos dos problemas e das soluções que poderiam passar despercebidos.

Representações de baixa fidelidade podem ser facilmente reelaboradas. Reduzem o número de variáveis de análise sobre uma situação, o que agiliza o processo projetual, pois a manipulação de poucas variáveis é muito mais simples do que contemplar todos os desdobramentos de um projeto ao mesmo tempo. Assim, permitem que se tome decisões rapidamente e que o projeto evolua, o que é útil principalmente nas fases exploratórias iniciais. Já as representações de alta fidelidade exigem muito mais esforço de desenvolvimento, justamente porque contemplam muitas variáveis ao mesmo tempo. Na exploração de ideias, a facilidade de manipulação das representações de baixa fidelidade é um trunfo, já na avaliação dessas ideias a situação se inverte e as de alta fidelidade se tornam mais vantajosas.

Se com outras representações procura-se deliberadamente focar (ULRICH, EPPINGER, 2012), filtrar (LIM, STOLERMAN, TENENBERG, 2008) ou enquadrar (SCHÖN, 1983) determinados aspectos dos problemas abordados, simplificando a realidade analisada (PUPO, CELANI, DUARTE, 2009), com a prototipagem física pretende-se o oposto. Nas representações não-abrangentes, projetistas e os responsáveis pela elaboração de ensaios empíricos têm de necessariamente escolher quais aspectos de um problema vão ser analisados. Portanto determinam quais são as variáveis de análise abordadas e excluem outras, mesmo que não estejam cientes disso.

Já os protótipos abrangentes demonstram as soluções propostas em sua totalidade e completude, não enquadram aspectos previamente estabelecidos e trazem à tona questões não compreendidas ou mesmo nem imaginadas pelos projetistas e que podem ser altamente relevantes aos projetos. Em todo projeto há “**desconhecimentos desconhecidos**” (SUTCLIFFE, SAWYER apud JENSEN, ELVERUM, STEINERT, 2017, p. 4), ou seja, aspectos que são importantes ao seu desenvolvimento, mas que só se tornam evidentes durante o processo projetual. Toda representação projetual, de uma forma ou de outra, auxilia os projetistas a desvendar esses desconhecimentos, porém protótipos, por serem representações mais completas, são os mais exaustivos nesse papel. Não permitem que os projetistas ignorem aspectos pertinentes ou filtrem o problema abordado, “adequando-o” à sua solução – uma inversão da lógica da resolução de problemas, que pode ser involuntária, mas é muito comum em processos projetuais. Também, com protótipos é maior a certeza de que todas as partes envolvidas no desenvolvimento de produtos – projetistas, clientes/usuários, fabricantes etc. - “falem a mesma língua” e efetivamente compreendam como os projetos deverão ser executados. Melhoram esses projetos pelo confronto com a realidade e auxiliam no entendimento sobre a natureza dos problemas e das soluções propostas.

Tabela 5 – Papéis dos diferentes tipos de representação

	Aprendizagem	Tomada de Decisões & <i>Milestones</i>	Comunicação	Integração
Rep. Gráficas & Simbólicas	X	X	X	
Maquetes & Ensaio	X	X	X	
Prototipagem Virtual	X	X	X	+ / -
Prototipagem Física	X	X	X	X

Fonte: Elaboração própria com base nos conceitos de Lauff, Kotys-Schwartz, Renstchler e Ulrich, Eppinger

A compatibilização entre os diversos aspectos de uma solução e a realidade em que se insere, sem filtros, é o que diversos autores estudados chamam de “integração”. Todas as formas de representação de projetos podem ser utilizadas na aprendizagem sobre o problema abordado, na tomada de decisões acerca do projeto, na representação de marcos de desenvolvimento dele e na comunicação de ideias projetuais entre os membros de uma equipe projetista e terceiros. Contudo, só as representações abrangentes conseguem manifestar e induzir a integração entre todos os aspectos de uma solução e entre essa e seu contexto (Tabela 5). A prototipagem virtual, ao conseguir representar a abrangência de um produto, mesmo que digitalmente, pode servir para a integração deste, mas só até certo ponto. No caso de produtos da Construção, que são físicos, a representação virtual não contempla a totalidade deles, uma vez que justamente não é física. Apenas a representação abrangente e física pode representar a integração completa de produtos físicos (ULRICH, EPPINGER, 2012, p.297-298).

No desenvolvimento de qualquer produto, existem diversas questões e problemas não previstos pelos projetistas, mas que irão impactar no seu uso e funcionamento. Busca-se, com o projeto, resolvê-los ao máximo, mas sempre haverá aspectos que fogem ao escrutínio. Indústrias que empregam protótipos físicos de alta fidelidade, normalmente o fazem, justamente, nas etapas finais dos projetos para resolver os últimos ajustes de um produto (ULRICH, EPPINGER, 1995, p.298). A Construção Civil, que raramente utiliza protótipos, é conhecida por frequentemente apresentar problemas de pós-ocupação e, também, durante a execução de obras, que tipicamente resultam em perdas materiais e retrabalho. A prototipagem física de alta fidelidade poderia contribuir para a resolução dessas falhas crônicas, uma vez que é, atualmente, a forma mais aprofundada de se realizar verificações empíricas sobre o projeto de produtos físicos.

Na Construção Civil há relativamente poucas inovações, quando comparada a outros setores, e possivelmente isso se deve às inseguranças inerentes a elas que, nessa indústria, não são facilmente contornadas. Outros setores produtivos são permitidos a ousar e se arriscarem mais, pois conseguem validar ou invalidar ideias novas, e potencialmente mal sucedidas, através da forma mais efetiva de verificação: a prototipagem. Empresas da Construção até desenvolvem inovações tecnológicas, porém, devido aos riscos e incertezas inerentes a elas, são pouco difundidas para a maior parte do Setor. Apenas, depois de amplamente consolidada, é que uma

tecnologia passa a ser adotada por um número razoável de outras empresas (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2009, p. 169).

Já os êxitos dos profissionais excepcionais que empregavam ou empregam ainda a prototipagem como abordagem de projeto evidenciam com ela pode impactar na qualidade e eficiência das construções, contornando os riscos da inovação. A seguinte citação de Jean Prouvé, um dos profissionais de exceção abordados nesta dissertação, evidencia essa cautela necessária à projeção:

Acima de tudo, não se deve desenhar projetos utópicos, porque a evolução só pode resultar da experiência prática, que a coloca em seu caminho.

Estudos realizados independentes da prática, devem ser evitados, ou mesmo proibidos. Tudo que é alheio raramente se conforma aos requerimentos e leva à perda de tempo. O construtor terá comentários a fazer no local. O projetista precisa também ser capaz de descobrir seus equívocos rapidamente e reconhecê-los antes; é preciso, portanto, haver um diálogo constante entre projetista e construtor, que devem trabalhar em equipe. [...]

Isso precisa ser reafirmado para eliminar voos de fantasia que não podem ser testados e meramente impedem o projetista progressista. Deve-se meramente projetar aquilo que pode ser executado, mas sempre no modo mais avançado e sem imitação (HUBER, STEINEGGER, 1971, p. 11. Tradução nossa.)

A inovação requer a validação para ser bem sucedida e se não há meios de embasar empiricamente ideias novas, a única alternativa que resta é recorrer a ideias velhas. Assim, o sucesso passado frequentemente se torna obstáculo para sucessos futuros.

[...] a especialização profissional pode ter efeitos negativos. No indivíduo, um alto grau de especialização pode levar à estreiteza de visão [...] conforme uma prática se torna mais repetitiva e rotineira, e conforme o conhecer-na-prática se torna cada vez mais tácito e espontâneo, o projetista pode perder oportunidades importantes para refletir sobre o que está fazendo. Ele pode descobrir que [...] é levado a padrões equivocados que não consegue corrigir. E se aprende as ser, como comumente acontece, seletivamente desatento a fenômenos que não se encaixam em suas categorias de conhecimento, então sofre de tédio ou desgaste e aflige seus clientes com as consequências de sua estreiteza e rigidez. Quando isso ocorre, o projetista “aprendeu demais” o que ele conhece. (SCHÖN, 1983, p. 62-63. Tradução nossa)

Projetistas experientes correm o risco de se tornarem viciados em soluções que já deram certo, teimando em sempre enquadrar todo e qualquer problema da mesma forma (Figura 88). Isso ocorre de um modo global na Construção, onde o uso quase exclusivo de representações de baixa ou média fidelidade leva à falta de garantias para propostas novas e conseqüentemente à insegurança para inovar. A solução para essa incerteza acaba sendo o conservadorismo: se não é possível comprovar que novas ideias funcionarão, elimina-se a novidade, e emprega-se apenas soluções anteriormente comprovadas, não por uma prática de inovação estruturada, mas sim pela mera pré-existência. Delega-se aos profissionais do passado a responsabilidade de criar e, assim, as inovações só ocorrem de forma tímida e incremental.

Figura 88 – “Quando tudo que se tem é um martelo, todo problema parece um prego”



Fonte: MCDONALD, Wren. In: IRWIN, Neil. **What if sociologists had as much influence as economists?** The New York Times, Março 2017. Disponível em: <https://nytimes.com/2017/03/17/upshot/what-if-sociologists-had-as-much-influence-as-economists>. Acesso em: Fevereiro 2020.

Quando existe algum grau de incerteza sobre um causado, por exemplo, pelo emprego de uma tecnologia nova, o desenvolvimento de tipologias inéditas ou a construção de edificações muito grandes, torna-se necessário o uso de mecanismos que deem garantias aos projetistas de que serão bem sucedidos. As representações de alta fidelidade servem justamente a esse propósito, pois permitem avaliar concretamente ideias, demonstrando se funcionam ou não. Dão subsídios para que projetistas se arrisquem, validem suas apostas e assim façam as suas soluções evoluírem de um modo ao mesmo tempo seguro e inovador. Ganha-se certezas sobre as incertezas e conhecimentos sobre os desconhecimentos.

Entende-se que esta é uma prática relevante das indústrias atualmente inovadoras e sua ausência faz falta à Construção Civil. De um modo geral, acredita-se que novos estudos que se debruçam sobre o tema podem contribuir para a melhora da qualidade dos projetos na Construção. Também, que presentemente há sequer um entendimento claro e estruturado do que efetivamente são protótipos e de que forma podem ser empregados no desenvolvimento de projetos.

A presente dissertação buscou contribuir para o entendimento dessas ferramentas ao organizar ideias, definições e conceitos teóricos a respeito da prototipagem, espalhados em estudos de diversas áreas; trazendo-os e adequando-os para a Construção Civil. Assim, espera-se que possa vir a auxiliar futuras pesquisas, fornecendo bases teóricas sobre o assunto, e liberar os pesquisadores para focarem-se em outros desenvolvimentos, ou mesmo questionar as ideias aqui propostas.

Possíveis pesquisas futuras

Por fim, delinea-se abaixo uma série de possíveis pontos a serem estudados em pesquisa futuras. Na presente dissertação foram apresentados diversos exemplos do uso de protótipos físicos de alta fidelidade na Construção. Contudo, o propósito com isso foi meramente de ilustrar uma categorização proposta, e, de forma alguma, pretendeu-se ser exaustivo em sua enumeração. Certamente existem muitos outros casos não apresentados aqui e inclusive desconhecidos pelo autor desta pesquisa. Uma linha de pesquisa que claramente se abre é o de desenvolver estudos de caso mais aprofundados sobre instituições e profissionais que empregam ou empregavam a prototipagem como método projetual na Construção, dentre os aqui apontados ou outros por descobrir. Inclusive o objetivo original desta pesquisa era justamente de fazê-lo sobre o arquiteto João Filgueiras Lima. Esse tipo de pesquisa poderá ser especialmente interessante se for sobre práticas contemporâneas, pois dessa forma seria possível desenvolvimento de pesquisas no formato de uma etnografia – sobre práticas profissionais, como a do *Renzo Piano Building Workshop* - ou de pesquisas-ação – nos casos de atividades acadêmicas, como o Canteiro Experimental. Dessa forma, poderia se adquirir conhecimentos muito mais aprofundados sobre o emprego efetivo de protótipos em processos projetuais.

Outro caminho vislumbrado seria o desenvolvimento de um estudo comparativo entre os modos de trabalhar em processos projetuais na Construção e em outras indústrias tais como a automobilística, a naval, da aviação ou de equipamentos ferroviários. Esse poderia se basear em pesquisa prévias desses setores e procurar observar as semelhanças e diferenças que ocorrem no desenvolvimento de produtos nessas áreas e na construção industrializada.

REFERÊNCIAS

BASTOS, Maria Alice Junqueira; ZEIN, Ruth Verde. **Brasil: arquiteturas após 1950**. São Paulo: Perspectiva, 2011.

BEAUDOUIN-LAFON, Michel; MACKAY, Wendy. **Prototyping tools and techniques**. in: JACKO, J. A; SEARS, A. (eds.) *The Human-Computer Interaction Handbook*. Mahway: Lawrence Erlbaum Associates, 2003, p. 122-142.

BRASIL, SENADO FEDERAL. **Diretrizes e Bases da Educação Nacional. Lei n. 9.394, de 20 de dezembro de 1996**. Brasília: Senado Federal, 2005

BUCHANAN, Peter. **Renzo Piano Building Workshop: complete works**. Vol 4. Londres, New York: Phaidon, 2000.

CALDERÓN, Francisco. **Quality control and quality assurance in hybrid mass timber high-rise construction : a case study of the Brock Commons**. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas) - The Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies Civil Engineering. Vancouver: The University of British Columbia, 2018.

CAMARGO, Renata Martinho de. **Estudo de eficiência para a ventilação natural dos sheds em hospitais da rede Sarah**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil). – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2011.

CAMBURN, Bradley A. *et al.* **Methods for Prototyping Strategies in Conceptual Phases of Design: Framework and Experimental Assessment**. in: *Proceedings of the ASME 2013*. Portland: ASME: 2013.

CARBONARI, Luana Toralles; LIBRELOTTO, Lisiane Ilha. **Estudo comparativo dos cases de habitação temporária “paper log house” e aplicações no Brasil**. *Mix Sustentável*, v. 5, n. 2. Florianópolis, 2019. p. 19-29.

CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Visão do Setor Privado**. In: **Balanco Nacional da Indústria da Construção**. 24 slides. Brasília, CBIC: 2013.

CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO CIVIL; FGV - FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **A produtividade na construção civil brasileira**. Brasília, CBIC: 2014.

CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Coletânea implementação do BIM para construtoras e incorporadoras**, v. 1. Brasília: CBIC, 2016.

CELANI, Gabriela; PUPO, Regiane Trevisan. **Prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção: definições e estado da arte no Brasil**. in: *Cadernos de pós graduação em arquitetura e urbanismo*. São Paulo: FAU Mackenzie, 2008.1, p. 31-41.

CENTRE POMPIDOU (org.) **Jean Prouvé: La Maison Tropicale**. 5ª. Ed. Paris: Ed. Centre Pompidou, 2009.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Relatório Prospectivo Setorial Construção Civil 2009**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2009.

CHARTIER, Thierry; BADEV, Alexander. **Rapid prototyping of ceramics**. In: SOMIYA, Shigeyuki (Org.). Handbook of advanced ceramics: materials, applications, processing, and properties. 2ª Ed. Waltham, MA: Elsevier, 2013. Cap. 6.5, p. 489-524.

CINQUALBRE, Olivier. **Habitations démontables et maisons usinées dans la production des Ateliers Jean Prouvé**. in: CENTRE POMPIDOU (org.). Jean Prouvé: La Maison Tropicale. 5ª. Ed. Paris: Ed. Centre Pompidou, 2009.

_____, Olivier. **La Maison Tropicale**. in: CENTRE POMPIDOU (org.). Jean Prouvé: La Maison Tropicale. 5ª. Ed. Paris: Ed. Centre Pompidou, 2009.

CLMA - CONSTRUCTION LABOR MARKET ANALYZER. **Construction Productivity in an Imbalanced Labor Market**. Construction Industry Resources, LLC, 2016.

COSTA, Lúcio. **Lúcio Costa: registro de uma vivência**. 2ª ed. São Paulo: Empresa das Artes, 1997.

CROSS, Nigel. **Engineering design methods: strategies for product design**. 3ªEd. Chichester: John Wiley & Sons Ltda, 2000.

CROSS, Nigel. **Designerly Ways of Knowing**. London: Springer-Verlag London Ltda, 2006.

CUNHA, Thaís Alves. **Utilização de viga vagão formada por peças retangulares de madeira para sustentação de fôrmas para concreto**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil). – Faculdade de Engenharia Civil. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

DEAN, Andrea Oppenheimer. **Rural Studio: Samuel Mockbee and an architecture of decency**. New York: Princeton Architectural Press, 2002.

DESIDERI, Paolo; NERVI JR, Pier Luigi; POSITANO, Giuseppe. **Pier Luigi Nervi**. 2ª ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1982.

DORST, Kees; CROSS, Nigel. **Creativity in the design process co-evolution of problem–solution**. In: Design Studies, v. 22, nº 5. Great Britain: Elsevier Science Ltda, 2001.

DORST, Kees. **The core of ‘design thinking’ and its application**. In: Design Studies, v. 32, nº 6. Great Britain: Elsevier Science Ltda, 2011.

EEKHOUT, Mick; VAN SWIETEN, Peter. **Full-scale material prototyping of building components in a virtual era**. in: International Engineering and Product Design Education Conference. Delft: 2004.

FLEIG, Karl (ed.). **Alvar Aalto: The Complete Work**. 2ª ed. Basel; Boston; Berlin: Birkhäuser, v. I, 1995.

FLEIG, Karl (ed.). **Alvar Aalto: The Complete Work**. 2ª ed. Basel; Boston; Berlin: Birkhäuser, v. II, 1995.

FMI – FAILS MANAGEMENT INSTITUTE; DBIA – DESIGN BUILD INSTITUTE OF AMERICA. **Design-Build Utilization: Combined Market Study**. FMI Corporation, 2018.

GUIMARÃES, Ana Gabriella Lima. **A obra de João Filgueiras Lima no contexto da cultura arquitetônica contemporânea**. 2010. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

HOUDE, Stephanie; HILL, Charles. **What do Prototypes Prototype?** in: HELANDER, M.; LANDAUER, T. K.; PRABHU, P. (eds.) *Handbook of Human-Computer Interaction*. 2ª Ed. Elsevier Science B. V., 1997. Cap. 16, p. 367-380.

HUBER, Benedikt; STEINEGGER, Jean-Claude. **Jean Prouvé, prefabrication: structures and elements**. London, New York: Praeger, 1971.

JENSEN, M. B.; ELVERUM, C. W.; STEINERT, M. **Eliciting Unknown Unknowns With Prototypes: Introducing Prototrials and Prototrial-Driven Cultures**. in: *Design Studies*, v. 49, Elsevier Ltd., 2017. p. 1–31.

KASBAR, Mohamed. **Investigating the performance of the construction process of an 18-storey mass-timber hybrid building**. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas) - The Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies Civil Engineering. Vancouver: The University of British Columbia, 2017.

KNAACK, Ulrich; CHUNG-KLATTE, Sharon; HASSELBACH, Reinhard. **Prefabricated Systems: Principles of Construction**. Basileia: Birkhauser, 2012.

KRONENBURG, Robert. **Portable Architecture**. 3ª Ed. Oxford: Elsevier Architectural Press, 2003.

LATORRACA, Giancarlo (org.) **João Filgueiras Lima Lelé**. Série arquitetos brasileiros. Lisboa: Editora Blau; São Paulo: Instituto Lina Bo e P.M. Bardi, 2000.

LAUFF, Carlyle; KOTYS-SCHWARTZ, Daria; RENTSCHLER, Mark. **What is a Prototype? What are the Roles of Prototypes in Companies?**. in: *Journal of Mechanical Design*, ASME, v. 140, n. 6, p. 061102-1 - 061102-12, jun. 2018. DOI: 10.1115/1.4039340.

LEE, Eleanor S.; SELKOWITZ, Stephen; CLEAR, Robert; INANICI, Mehlika; INKAROJRIT, Vorapat; LAI, Judy. **Daylighting the New York Times headquarters building**. New York: The New York Times Company. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory. Institute of Energy and Sustainable Development, 2005.

LIM, Youn-Kyung; STOLTERMAN, Erik; TENENBERG, Josh. **The Anatomy of Prototypes - Prototypes as Filters, Prototypes as Manifestations of Design Ideas.** in: ACM Transactions on Computer-Human Interaction, New York: ACM Press, 2008. DOI: 10.1145/1375761.1375762.

LIMA, João Filgueiras. **Escola Transitória: modelo rural.** Brasília: MEC/CEDATE, 1984.

LIPMAN, Jonathan. **Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.** New York: Rizzoli, 1986.

LOTUFO, Tomaz Amaral. **Um novo ensino para outra prática. Rural Studio e Canteiro Experimental, contribuições para o ensino de arquitetura no Brasil.** 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

LUKIANCHUKI, Marieli Azoia. **A evolução das estratégias de conforto térmico e ventilação natural na obra de João Filgueiras Lima, Lelé: Hospitais Sarah de Salvador e do Rio de Janeiro.** 2010. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

LUKIANCHUKI, Marieli Azoia; CAIXETA, Michele Caroline Bueno Ferrari; FABRICIO, Márcio Minto; CARAM, Rosana. **Industrialização da construção no Centro de Tecnologia da Rede Sarah (CTRS). A construção dos hospitais da Rede Sarah: uma tecnologia diferenciada através do Centro de Tecnologia da Rede Sarah – CTRS.** *Arquitextos*, São Paulo, ano 12, n. 134.04, Vitruvius, jul. 2011. Disponível em: <https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/12.134/3975> Acesso em Dez 2019.

MACK, Gerhard. **Herzog & de Meuron 1992-1996: Complete Works.** v. 3. Basel: Birkhäuser, 2005.

MENDES, Raísa Coelho; AIBE, Yukari Benedetti. **Design Emergencial: Soluções encontradas para amenizar as consequências dos desastres naturais.** Orientadora: BARBOSA, Lara Leite. NOAH - Núcleo Habitat sem Fronteiras. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo: FAUUSP, 2012.

MESNIL, Romain. **Stability of elastic gridshells.** Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Department of Civil and Environmental Engineering. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2013.

NAUMANN, J. D.; JENKINS, A. M. **Prototyping: The new paradigm for systems development.** *MIS Quarterly*, v. 6, 1982. p. 29–44.

NEGRI, Fernanda de; CAVALCANTI, Ricardo Luiz (org.) **Produtividade no Brasil: desempenho e determinantes.** vol 1. Brasília: ABDI: IPEA, 2014.

PASSARO, Andres; ROHDE, Clarice. **Casa revista: arquitetura de fonte aberta.** *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v. 11, n. 2, p. 25-41 jul-set. 2016.

PERÉN, Jorge Isaac Montero. **Ventilação e iluminação naturais na obra de João Figueiras Lima “Lelé”: estudo dos hospitais da rede Sarah Kubitschek Fortaleza e Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

PHILLIPS, Estelle M.; PUGH, Derek S. **How to get a PhD: a handbook for students and their supervisor**. 4ª ed. Berkshire: Open University Press, 2005.

PROTÓTIPO. In: **DICIONÁRIO Michaelis** brasileiro da língua portuguesa. Editora Melhoramentos, 2020. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/prot%C3%B3tipo/>. Acesso em jan. 2020.

PROTOTYPE. **Merriam-Webster.com DICTIONARY**. Merriam-Webster, 2020. Disponível em: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/prototype>. Acesso em jan. 2020.

PUPO, Regiane Trevisan; CELANI, Gabriela; DUARTE, José Pinto. **Digital materialization for architecture: definitions and techniques**. in: PRO Prática Profissional e Tecnologias Digitais. São Paulo: SIGRADI, 2009. p. 439-442.

REID, Robert. **Mock-ups Help Engineers Test Features of New York Times Building**. New York: Civil Engineering News, 2006.

RISSELADA, Max; LATORRACA, Giancarlo (org.) **A arquitetura de Lelé: fábrica e invenção**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo: Museu da Casa Brasileira, 2010.

RITTEL, Horst W. J. **The Reasoning of Designers**. In: Arbeitspapier zun International Congress on Planning and Design Theory. Stuttgart: Institut für Grundlagen der Planung, Universität Stuttgart, 1988.

RITTEL, Horst W. J.; WEBBER, Melvin M. **Dilemmas in a General Theory of Planning**. In: Policy Sciences, 4. Scotland: Elsevier Scientific Publishing Company, 1973.

RONCONI, Reginaldo Luiz Nunes. **Canteiro experimental - uma proposta pedagógica para a formação do arquiteto e urbanista**. Pós. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP, n. 17, p. 142-159, 1 jun. 2005.

RONCONI, Reginaldo Luiz Nunes. **Inserção do canteiro experimental nas faculdades de arquitetura e urbanismo**. 2002. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ROOZENBURG, N. F. M.; EEKELS, J. **Product Design: Fundamentals and Methods**. Chichester: John Wiley & Sons Ltda, 1995.

RPBW - RENZO PIANO BUILDING WORKSHOP. **Diogene / Renzo Piano**. 01 Jul 2013. ArchDaily. Disponível em: <https://archdaily.com/396082/diogene-renzo-piano>. Acesso em: Dez 2019.

SAMPAIO, RF; MANCINI, MC. **Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica.** Revista Brasileira de Fisioterapia, v. 11, nº. 1, São Carlos, 2007. p. 83-89.

SCHÖN, Donald A. **The reflective practitioner: How professionals think in action.** New York: Basic Books, 1983.

SEGUIN, Patrick. **Jean Prouvé Architecture: available pieces.** Paris: Galerie Patrick Seguin. Disponível em: <https://patrickseguin.com/en/designers/architect-jean-prouve/available-houses-jean-prouve>. Acesso em Dez 2019.

SHIGERU BAN ARCHITECTS. **Paper Log House.** Shigeru Ban Architects, 1995. Disponível em: http://shigerubanarchitects.com/works/1995_paper_log_house_kobe. Acesso em: Dez 2019.

SHIGERU BAN ARCHITECTS. **Supporting Planning In Kalobeyei Settlement, Kenya.** Shigeru Ban Architects, 2018. Disponível em: http://www.shigerubanarchitects.com/works/2018_kenya_04. Acesso em: Dez 2019.

SMITH, Ryan. **History of Prefabrication: A cultural survey.** in: Proceedings of the Third International Congress of Construction History. Cottbus, May 2009.

_____, Ryan. **Prefab Architecture: A guide to modular design and construction.** New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

SCHOOLY, Tim. First Look: the mock-up building for The Tower at PNC Plaza. **Pittsburgh Business Times**, Pittsburgh, 24 março 2015. Disponível em: <https://www.bizjournals.com/pittsburgh/news/2015/03/24/first-look-the-mock-up-building-for-the-tower-at.html>. Acesso em: Junho 2019.

SEBRAE. **Taxa de sobrevivência das empresas no Brasil.** In: Coleção Estudos e Pesquisas. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas, 2011.

SKOG, Daniel; SÖDERLUND, Markus. **Virtual information representation.** In Proceedings of the 22nd Information Systems Research Seminar in Scandinavia. Keuruu: 1999.

SOAT - THE SCHOOL OF ARCHITECTURE AT TALIESIN. **The shelter experience 2019.** Disponível em: <https://taliesin.edu/masters-of-architecture/student-life/shelter-experience/>. Acesso em jan 2020.

SOAT - THE SCHOOL OF ARCHITECTURE AT TALIESIN. **Thesis Program Description 2018.** Scotsdale: SOAT, 2018.

STROIK, Brian. **Why a Mock Up, Because the Owner Expects it Done Right.** in: BEST2 Conference, Portland: 2010.

SUNRISE ERECTORS. **Complete Mockup At The Citizens Bank Campus Project.** 30 junho 2017. Disponível em: <http://sunriseerectors.com/great-shot-of-the-complete-mockup-at-the-citizens-bank-campus-project-in-johnston-ri-looking-forward-to-getting-out-on-site-this-summer-gc-dimeo-construction-company-architect-elkus-manfredi/>. Acesso em Jun 2019.

THE FOUNDER. Direção: John Lee Hancock. Nova York: The Weinstein Company, 2016. Streaming Netflix, 116 min.

TREVELYAN, J. **Reconstructing engineering from practice.** in: Engineering Studies, v. 2, nº. 3. 2010. p.175-195. DOI: 10.1080/19378629.2010.520135

ULRICH, Karl T.; EPPINGER, Steven D. **Prototyping.** in: Product Design and Development. 5ª Ed. New York: McGraw-Hill Companies, 2012. Cap. 14, p. 289-309.

YU, Fei.; PASINELLI, Michele; BREM, Alexander. **Prototyping in theory and in practice: A study of the similarities and differences between engineers and designers.** in: Creativity and Innovation Management, v. 27, n. 2. 2018. p. 121-132. DOI:10.1111/caim.1224