

Marina Ferreira Borges

**CONVERSAS ENTRE ARQUITETOS E ENGENHEIROS
NO ENSINO DE PROJETOS**

Belo Horizonte
2019

Marina Ferreira Borges

CONVERSAS ENTRE ARQUITETOS E ENGENHEIROS NO ENSINO DE PROJETO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação NPGAU da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração: Teoria, Produção e Experiência do Espaço

Orientador: Roberto Eustaáquio dos Santos

Belo Horizonte
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

B732c Borges, Marina Ferreira.
Conversas entre arquitetos e engenheiros no ensino de projetos
[manuscrito] / Marina Ferreira Borges. - 2019.
284f. : il.

Orientador: Roberto Eustaáquio dos Santos.

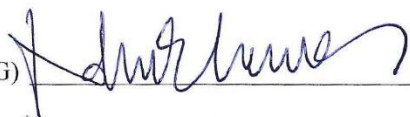
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de
Arquitetura.

1. Arquitetura – Estudo e ensino- Teses. 2. Arquitetura – Projetos e
plantas – Teses. 3. Projeto estrutural – Teses. 4. Projeto Arquitetônico - Teses.
5. Engenharia de estruturas – Teses. I. Santos, Roberto Eustaáquio dos. II.
Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.

CDD 720.7

Tese defendida junto ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo/ NPGAU da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, e aprovada em 30 de agosto de 2019 pela Comissão Examinadora:

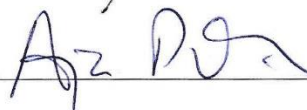
Prof. Dr. Roberto Eustaáquio dos Santos (Orientador-EA-UFGM)



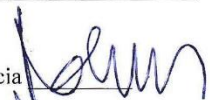
Profa. Dra. Ana Paula Baltazar dos Santos (EA-UFGM)



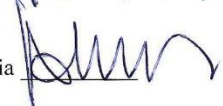
Profa. Dra. Anja Pratschke (USP São Carlos)



Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani (UNICAMP) ___ por meio de videoconferência



Prof. Dr. José Pinto Duarte (Pennsylvania State University) _ por meio de videoconferência



Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti (Escola Politécnica da USP) _por meio de videoconferência_

*Dedico este trabalho aos meus pais, ao João e ao Joaquim.
Para vocês, todo o meu amor.*

AGRADECIMENTOS

Esta tese é o resultado de muita conversa e colaboração, que envolveu diretamente mais de pessoas, entre alunos, professores e engenheiros convidados. Sem vocês a realização deste trabalho não teria sido possível.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Ro pela orientação cooperativa, generosa, gentil e fundamental para que eu pudesse enxergar o trabalho para além da dimensão técnica do assunto.

Ao NPGAU, por ter disponibilizado meios para que eu pudesse ter desenvolvido este estudo e possibilitado a realização dos experimentos por meio do ensino de projetos. Agradeço especialmente à professora Ana Paula Baltazar pela contribuição valiosa com o trabalho. Aos alunos da UFMG, agradeço por terem se engajado nas propostas experimentais de ensino de maneira comprometida e séria, tendo se mostrado abertos para a aprendizagem de novas linguagens

À coordenação do curso de Arquitetura e Urbanismo da PUC Minas, e, principalmente aos professores Silvio Motta e Antonio Grillo por terem me convidado sucessivas vezes para atuar como professora substituta, me oferecendo a oportunidade para a aplicação de diversos métodos de ensino, e me apoiando para que eu adquirisse também uma maior experiência com a prática docente. Aos alunos da PUC Minas pelas contribuições com os trabalhos realizados.

Aos orientandos de TCC Isabela Resende, e, de maneira especial ao Lucas Duarte pela coragem e pela confiança de se aventurarem por novos caminhos.

Aos professores Pedro Arantes e Eduardo Mortimer pela leitura atenciosa e pelas referências trazidas na ocasião da banca de qualificação.

Aos engenheiros convidados Guilherme Vaz, Ricardo Avelino, Lucas Ladeira, e, especialmente ao amigo Lucas Grillo por toda a disponibilidade e contribuição com a proposta desta pesquisa. Às colegas engenheiras Isabel Moreira e Luiza Boechat pelo breve, mas importante encontro no MIT, em que tivemos conversas fundamentais para a consolidação das ideias desenvolvidas neste trabalho. E, ao engenheiro, professor e orientador do mestrado, e, do início do doutorado, Ricardo Fakury, pela parceria e pelo apoio sempre que solicitei. Vocês foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese.

E a Deus, agradeço mais uma vez a oportunidade de aprendizado.

RESUMO

O ensino de estruturas é um elemento chave para estimular os estudantes de arquitetura a pensar sobre as relações entre forma, materialidade e tectônica, levando a um ponto de convergência entre as disciplinas de projeto arquitetônico e engenharia estrutural, cuja falta de organicidade reflete e acentua a fragmentação entre o projeto e o canteiro. Os planos de ensino das disciplinas de estruturas enfatizam que seu objetivo nos cursos de arquitetura seria promover o diálogo entre arquitetos e engenheiros na prática de projeção por meio de uma linguagem comum. Mas, na prática docente, esse desejável diálogo entre as disciplinas de projeto arquitetônico e o ensino de estruturas está efetivamente acontecendo? Os modelos hoje existentes para ensinar estruturas são capazes de absorver as mudanças e possibilidades abertas pelas novas tecnologias e seu impacto na prática do projeto arquitetônico? A mudança de métodos de ensino seria suficiente para corrigir trajetórias nocivas dos mecanismos de produção e reprodução do campo? Partindo do pressuposto de que é preciso desenvolver um novo modelo educacional interdisciplinar que integre questões arquitetônicas, estruturais e digitais, propusemos a realização de disciplinas híbridas, experimentadas entre os anos de 2016 e 2018, nos cursos de arquitetura da UFMG e da PUC Minas. O modelo desenvolvido ao longo dessas disciplinas permitiu uma efetiva prática dialógica do projeto, possibilitando que os estudantes de arquitetura elaborassem novos sistemas de projeção por meio da construção de processos cooperativos entre arquitetos e engenheiros, interagindo com ferramentas computacionais de simulação do comportamento estrutural como forma de auxiliar na tomada de decisões em situações complexas de projeto.

Palavras-chave: Ensino de Arquitetura. Ensino de Projetos. Ensino de Estruturas. Modelo Paramétrico. Projeto baseado em *performance*. Tectônica Digital.

ABSTRACT

Structural education is a key element for stimulating architecture students to think about the relations between form, materiality and tectonics, leading to a point of convergence between the disciplines of architectural design and structural engineering, whose lack of organicity only accentuates the fragmentation between design and construction. The teaching plans of the disciplines of structures emphasize that the aim of these disciplines in the courses of architecture is to promote the dialogue between architects and engineers in the practice of design through a common language between them. But in teaching practice, is this desirable dialogue between architectural design disciplines and structural education effectively taking place? Can the existing models to teach structures absorb the changes and possibilities opened by new technologies and their impact on architectural design practice? Would changing teaching methods be enough to correct harmful traits of the field's production and reproduction mechanisms? To develop a new educational model that integrates architectural, structural and digital issues, we proposed the realization of hybrid disciplines, experimented between the years 2016 and 2018, in the architecture courses of UFMG and PUC Minas. The model developed among these disciplines allowed an effective dialogic practice of design, enabling architecture students to elaborate new project systems that encourage the construction of a collective practice of knowledge through cooperative processes between architects and engineers, interacting with computational tools of simulation of structural behavior as a way to assist in making decisions in complex design situations.

Keywords: Architectural Education. Architectural Design Education. Structural Education. Parametric Model. Performance-based design. Digital Tectonics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 -	Projeto baseado em <i>performance</i> desenvolvido para concepção de estrutura de torre eólica	17
FIGURA 02 -	Exemplo da estética estrutural desenvolvida no séc. XIX - Galerie des Machines projetada pelo arquiteto Ferdinand Duterd (1945-1906) em colaboração com o engenheiro Victor Contamin (1840-1893) e construída para a Exposição Universal de Paris em 1889.	32
FIGURA 03 -	Mecanismos de produção e reprodução do método <i>Beaux-Arts</i>	37
FIGURA 04 -	<i>Maison Dom-ino</i> , Le Corbusier, 1915	41
FIGURA 05 -	Palazzetto dello Sport, Pier Luigi Nervi, 1958.	42
FIGURA 06 -	Heydar Aliyev Center de Zaha Hadid: projeto, construção da estrutura e obra acabada.	48
FIGURA 07 -	Projeto para o Estádio Nacional de Pequim, Herzog & de Meuron, 2003-2008	49
FIGURA 08 -	Diagramas estruturais para projeto do edifício CCTV	50
FIGURA 09 -	Proposta conceitual para uma estética estrutural “informal”	52
FIGURA 10 -	Explorações do <i>grid</i> estrutural realizadas por Cecil Balmond	53
FIGURA 11 -	Plantas para o projeto do estádio versões M e N	60
FIGURA 12 -	Modelo experimental desenvolvido por Frei Otto e equipe	61
FIGURA 13 -	Operador utilizando o programa <i>Sketchpad</i>	63
FIGURA 14 -	<i>Performance “Variations V”</i>	66
FIGURA 15 -	Geração da forma por meio de técnica de otimização topológica	68
FIGURA 16 -	Esquema volumétrico inicial no PACE relacionando espaço e função, e saída de dados	70
FIGURA 17 -	Exterior do Museu Guggenheim de Bilbao (à esquerda) e esculturas de Richard Serra no interior (à direita)	75
FIGURA 18 -	Análise do fluxo de forças por MEF para a produção do pavilhão ICD/ITKE	77

2013-2014

FIGURA 19 -	Fabricação robótica dos componentes e montagem da estrutura do Pavilhão ICD/ITKE 2013-2014	80
FIGURA 20 -	Percurso de aprendizagem das disciplinas de estruturas nos cursos de Arquitetura (curso diurno versão curricular 2014/1) x Engenharia Civil (versão curricular 1998/1) da UFMG	83
FIGURA 21 -	Estudos de deformação para curvas elásticas realizados por Claude-Louis Navier, 1826	87
FIGURA 22 -	Experimentação com o domo geodésico	94
FIGURA 23 -	Princípio formulador do MEF	96
FIGURA 24 -	Exemplo de concepção e visualização do comportamento estrutural no <i>software SAP2000</i>	98
FIGURA 25 -	Exemplo de projeto de estudante para ponte (1990) – protótipo físico (à esquerda) e análise estrutural no SAP90 (à direita)	103
FIGURA 26 -	Exercícios projetuais de reconfiguração do sistema estrutural para projeto Phaeno Center	105
FIGURA 27 -	Diagrama dos fundamentos da conversação	111
FIGURA 28 -	Modelo conversacional <i>homem-máquina</i> adaptado de Pangaro (2017)	113
FIGURA 29 -	Modelo conversacional <i>homem-máquina-homem</i> adaptado de Pangaro (2017)	115
FIGURA 30 -	Sistema linear	116
FIGURA 31 -	Sistema autorregulatório	116
FIGURA 32 -	Modelo de design co-evolucionário	117
FIGURA 33 -	Sistema de aprendizagem	119
FIGURA 34 -	Sistema de aprendizagem autorregulado do processo de <i>experimentação-na-ação</i>	120
FIGURA 35 -	Sistema de conversa	121
FIGURA 36 -	Estudo de geometria no <i>Kit Mola</i> (à esquerda) e em protótipo (à direita)	125

FIGURA 37 -	Estudo dos fluxos de força	127
FIGURA 38 -	Projeto A: estudo da geometria da laje nervurada hexagonal	129
FIGURA 39 -	Projeto A: distribuição e cálculo dos pilares por área de influência	130
FIGURA 40 -	Prototipagem do Projeto A utilizando fabricação digital	130
FIGURA 41 -	Parâmetros para a concepção estrutural	138
FIGURA 42 -	Exercício proposto para cálculo de pórtico	140
FIGURA 43 -	Projeto A: Estudo da geometria por meio do <i>software SketchUp</i> (à esquerda), protótipo físico (à direita)	142
FIGURA 44 -	Projeto A: Representação da geometria em ferramenta digital paramétrica	142
FIGURA 45 -	Projeto A: análise dos perfis escolhidos no <i>SAP2000</i>	143
FIGURA 46 -	Projeto B: proposta inicial para a estrutura	144
FIGURA 47 -	Projeto B: análise dos perfis com as novas barras de travamento (à esquerda) e análise do diagrama de Momento Fletor (à direita)	145
FIGURA 48 -	Projeto C: deslocamento em Z	146
FIGURA 49 -	Projeto D: diagrama de momento fletor	148
FIGURA 50 -	Estrutura do Aeroporto de Stuttgart	150
FIGURA 51 -	Projeto F: validação de perfis no <i>SAP2000</i> da primeira proposta (à esquerda) e da segunda proposta (à direita)	151
FIGURA 52 -	Projeto <i>Next 21</i> , Osaka, 1993	159
FIGURA 53 -	Raciocínio tipológico x raciocínio topológico para a concepção estrutural	160
FIGURA 54 -	Concepção estrutural por meio de técnica de otimização topológica realizado pelo Zaha Hadid Architect`s CODE group	162
FIGURA 55 -	Exemplo de negociação de parâmetros	163
FIGURA 56 -	Projeto A: Exemplo de proposta tipológica	165
FIGURA 57 -	Projeto B: proposta de projeto orientado para o material	166

FIGURA 58 -	Projeto C: proposta	168
FIGURA 59 -	Teste das malhas triangular (à esquerda), hexagonal (ao centro) e quadrangular (à direita)	173
FIGURA 60 -	Simulação no <i>Kangaroo</i>	174
FIGURA 61 -	Exemplo de projeto de <i>form-finding</i>	175
FIGURA 62 -	Projeto final	176
FIGURA 63 -	Malha com 2 balões em cada nó	178
FIGURA 64 -	Protótipo 1:1 finalizado	179
FIGURA 65 -	Protótipos A, B e C, respectivamente	185
FIGURA 66 -	Protótipos D e E, respectivamente	186
FIGURA 67 -	Protótipo F de cobertura em forma livre	187
FIGURA 68 -	Teste de força e resistência dos protótipos	188
FIGURA 69 -	Protótipos de bancos A, B e C, respectivamente	189
FIGURA 70 -	Protótipos de cadeiras A e B	190
FIGURA 71 -	Protótipo de estrutura em padrão <i>Voronoi</i>	191
FIGURA 72 -	Projeto A: proposta	200
FIGURA 73 -	Projeto A: protótipo estrutural	201
FIGURA 74 -	Projeto A: análise estrutural computacional (gráfico de utilização dos perfis selecionados)	202
FIGURA 75 -	Projeto B: diagrama de articulação espacial	202
FIGURA 76 -	Projeto B: protótipo	203
FIGURA 77 -	Projeto B: proposta inicial e proposta final	204
FIGURA 78 -	Protótipos dos projetos C, D e E	205
FIGURA 79 -	Projeto C: proposta	206
FIGURA 80 -	Projeto F: proposta e protótipo	207

FIGURA 81 -	Projeto F: análise de utilização dos perfis	208
FIGURA 82 -	Projeto G: protótipo	209
FIGURA 83 -	Projeto H: proposta e protótipo	210
FIGURA 84 -	Projeto I: protótipo	212
FIGURA 85 -	Projeto J: protótipo (à esquerda) e análise estrutural computacional (à direita)	213
FIGURA 86 -	Projeto K: proposta estrutural	213
FIGURA 87 -	Projeto L: análise estrutural computacional	215
FIGURA 88 -	Projeto M: protótipo	216
FIGURA 89 -	Projeto N: protótipo	217
FIGURA 90 -	Projeto N: proposta final	218
FIGURA 91 -	Resultado da otimização topológica	226
FIGURA 92 -	Blocos tipo A, B, C e D, respectivamente	226
FIGURA 93 -	Variedade de combinações dos blocos	227
FIGURA 94 -	Fôrmas iniciais (à esquerda) e fôrma com mecanismos de abertura (à direita)	229
FIGURA 95 -	Bloco A, B e D respectivamente e suas linhas de fissura após ensaio de compressão	230
FIGURA 96 -	Diagrama do processo elaborado	232
FIGURA 97 -	Sistema de aprendizagem autorregulado	243
FIGURA 98 -	O papel da arquitetura na produção em manufatura heterogênea	257
FIGURA 99 -	O papel da engenharia na produção em manufatura heterogênea	258
FIGURA 100	Potencial de construção de processos de instrumentalização secundária na construção civil por meio de projeção tectônica	260

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 01 - Gráfico comparativo entre carga horária de disciplinas de estruturas cursadas pelos estudantes matriculados	134
GRÁFICO 02 - Percepção dos alunos com relação ao processo de aprendizagem do processo paramétrico e de análise estrutural	219
GRÁFICO 03 - Percepção dos alunos com relação à contribuição do processo para a articulação espacial	220

LISTA DE APÊNDICES

- APÊNDICE A - Dissertação: “Design estrutural baseado em desempenho aplicado ao desenvolvimento de estrutura de torre eólica”
- APÊNDICE B - Apresentação: Análise dos percursos de aprendizagem das disciplinas de estruturas nos cursos de Arquitetura x Engenharia Civil da UFMG
- APÊNDICE C - Plano de aulas: disciplina “Projeto em Estruturas de Concreto Armado”
- APÊNDICE D - Plano de ensino: disciplina “Arquitetura e Concepção Estrutural Digital”
- APÊNDICE E - Aula: Proposta de exercício projetivo da disciplina “Arquitetura e Concepção Estrutural Digital”
- APÊNDICE F - Manual: método de análise estrutural no *SAP2000*
- APÊNDICE G - Questionários: disciplina “Arquitetura e Concepção Estrutural”
- APÊNDICE H - Plano de ensino: disciplina “OFIAUP - Parcelamento e Assentamentos Habitacionais para o desenvolvimento de assentamentos habitacionais populares”
- APÊNDICE I - Questionários: disciplina “OFIAUP - Parcelamento e Assentamentos Habitacionais para o desenvolvimento de assentamentos habitacionais populares”
- APÊNDICE J - Aula introdutória: Oficina “Estruturas de Formas Ativas”
- APÊNDICE K - Questionários: Oficina “Estruturas de Formas Ativas”
- APÊNDICE L - Plano de Ensino: disciplina “Projeto em Estruturas Metálicas e de Madeira”
- APÊNDICE M - Questionários: disciplina “Projeto em Estruturas Metálicas e de Madeira”
- APÊNDICE N - Plano de Ensino: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- APÊNDICE O - Aula: Articulação Espacial - disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- APÊNDICE P - Questionários: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- APÊNDICE Q - Artigo: Fabricação digital no Brasil e as possibilidades de mudança de paradigma no setor da construção civil

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A - Plano de Ensino: disciplina “Projeto em Estruturas de Concreto Armado”
- ANEXO B - Banner: Constructive method for spatial articulation
- ANEXO C - Trabalhos Seminário: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO D - Protótipos: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO E - Projeto A: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO F - Projeto B: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO G - Projeto C: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO H - Projeto D: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO I - Projeto E: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO J - Projeto F: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO K - Projeto G: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO L - Projeto H: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO M - Projeto I: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
-
- ANEXO N - Projeto J: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO O - Projeto K: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO P - Projeto L: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO Q - Projeto M: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO R - Projeto N: disciplina “Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”
- ANEXO S - Trabalho de Conclusão de Curso: “A utilização da arquitetura *high low* na criação de elementos construtivos alternativos”

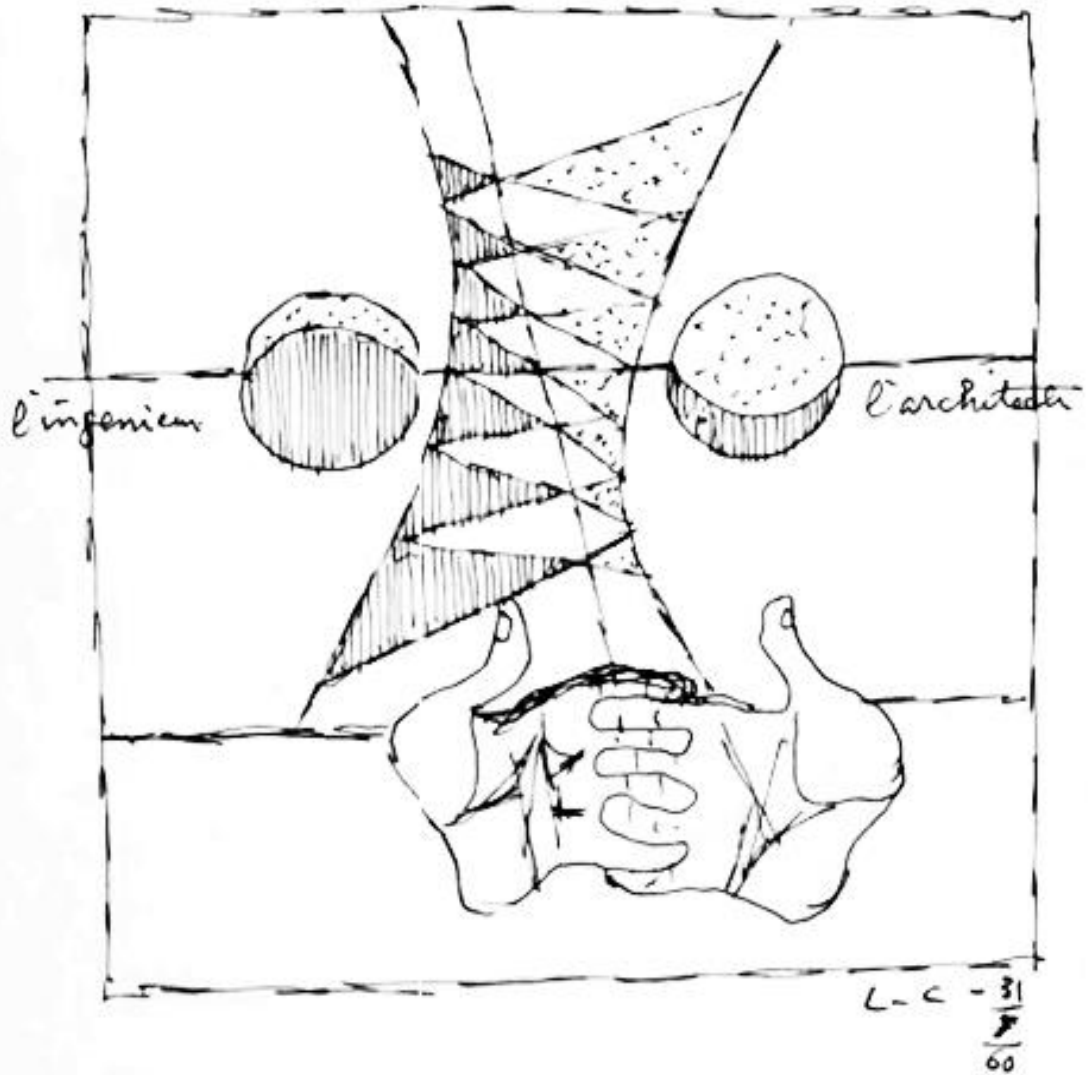
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Percurso do estudo	19
1.1.1	<i>A conversação como método</i>	24
2	PORQUE CONVERSAR	29
2.1	Mecanismos de produção e reprodução do campo da arquitetura	29
2.1.1	<i>Construção social das relações entre arquitetos e engenheiros</i>	38
2.2	A conversa emergente	45
2.2.1	<i>Procedimentos conservativos</i>	46
2.2.2	<i>Procedimentos não conservativos</i>	54
2.2.2.1	Modelo paramétrico	57
2.2.2.2	<i>Performance</i>	64
2.2.2.3	Tectônica Digital	71
3	COMO CONVERSAR	81
	PARTE I: MÉTODOS DE ENSINO DE ESTRUTURAS NOS CURSOS DE ARQUITETURA	86
3.1	Método Analítico	86
3.2	Métodos Experimentais	90
3.3	Métodos Computacionais	95
3.3.1	<i>Universidade de Berkeley</i>	100
3.3.2	<i>Universidade de Harvard-MIT</i>	103
3.3.3	<i>Universidade de Zurich</i>	106
	PARTE II: CONVERSAÇÃO COMO MÉTODO DE OBSERVAÇÃO, REFLEXÃO E APRENDIZAGEM	108
3.4	A conversação como método de observação	110
3.4.1	<i>Conhecer-na-ação</i>	110
3.4.1.1	<i>Conversa homem-máquina</i>	112
3.4.1.2	<i>Conversa homem-máquina-homem</i>	114
3.4.2	<i>Reflexão-na-ação e a construção de um sistema de aprendizagem</i>	115

PARTE III: EXPERIMENTAÇÃO-NA-AÇÃO	122	
3.5	Observação dos experimentos	122
3.5.1	<i>EXPERIMENTO 1: Projeto em Estruturas de Concreto Armado</i>	122
3.5.2	<i>EXPERIMENTO 2: Arquitetura e Concepção Estrutural Digital</i>	133
3.5.3	<i>EXPERIMENTO 3: Open Building e Form-finding estrutural</i>	157
3.5.4	<i>EXPERIMENTO 4: Oficina Estruturas de Formas Ativas</i>	171
3.5.5	<i>EXPERIMENTO 5: Projeto em Estruturas Metálicas e de Madeira</i>	182
3.5.6	<i>EXPERIMENTO 6: Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial</i>	194
3.5.7	<i>EXPERIMENTO 7: Arquitetura High-Low</i>	223
3.6	Reflexão sobre os experimentos observados	233
3.6.1	<i>Experimentos Exploratórios</i>	234
3.6.2	<i>Teste de Movimento</i>	235
3.6.3	<i>Teste de Hipóteses</i>	237
3.7	Reflexão para novos experimentos	239
4	CONVERSA EXPANDIDA	244
4.1	Reconstrução do modelo técnico de projeção	247
4.2	O papel da Universidade	255
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	262
	REFERÊNCIAS	268
	APÊNDICES	ARQUIVO DIGITAL
	ANEXOS	ARQUIVO DIGITAL

Les tâches de l'ingénieur

Les tâches de l'architecte



"Le nouvel aujourd'hui: les tâches de l'ingénieur et de l'architecte",
Le Corbusier, 31 de maio de 1960

1 INTRODUÇÃO

O ensino de estruturas na arquitetura não é um fim em si como nos cursos de engenharia que formam profissionais que desenvolvem cálculos estruturais; ele deve ser um meio para que o estudante pense a tectônica¹ da forma. A fragmentação entre as disciplinas de projeto e estruturas corrobora um pensamento projetual atectônico², favorecendo a aplicação simplista da técnica e a geração de imagens da moda (FRAMPTON, 1995). A organização disciplinar dos currículos³ tende a não propiciar aos estudantes de arquitetura o desenvolvimento do pensamento tectônico, mas, ao contrário, serve para sustentar os mecanismos de produção e reprodução segmentados da organização do mundo do trabalho e da economia financeira no sentido de maximizar a eficiência e o lucro no setor da construção civil.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, o estudo do pensamento tectônico fez com que eu pudesse realizar uma importante reflexão sobre minha formação e trajetória profissional, e em que momento a cultura tectônica me instigou a desenvolver esta abordagem como

¹ Na etimologia grega, o termo “tectônico” deriva da palavra “*tekton*”, que significa carpinteiro ou construtor. O termo se referiria a um artesão que trabalhava com materiais pesados, como pedra e madeira, exceto o metal. O termo “*tekton*” também tinha uma conotação poética, em que o artesão explora o potencial de expressão da técnica construtiva. Sendo assim, para Frampton (1995), a tectônica se refere à poética da construção, em que a arte e o ofício estão intrinsecamente conectados.

² Sekler introduz o conceito de atectônica como “uma maneira pela qual a interação expressiva de carga e suporte na arquitetura é visualmente negligenciada ou obscura” (1973 *apud* Frampton, 1995, p.19).

³ Os currículos são frutos de pressões do mundo do trabalho, sendo um instrumento político que se vincula à reprodução da cultura, ideologia e relações de poder da classe dominante. Há uma correlação entre a fragmentação do currículo e a divisão do trabalho nos canteiros.

objeto de investigação da pesquisa acadêmica. Ao final da minha graduação em Arquitetura e Urbanismo, no ano de 2005, tive a oportunidade de realizar um estágio profissional em um escritório de arquitetura na cidade de Valência na Espanha. Para Frampton (1995), a prática arquitetônica espanhola tem sido uma das mais tectonicamente consistentes encontradas em qualquer lugar nos últimos anos. No escritório de arquitetura em que trabalhei, deparei-me com uma prática muito diferente da que havia vivenciado no Brasil: o arquiteto superior, com uma formação ampla de oito anos, era o único responsável pelo projeto e construção da edificação. Esse profissional projetava a arquitetura, calculava a estrutura e acompanhava a construção, apoiado pelo arquiteto técnico, cuja formação de cinco anos não permitia a projeção, mas o capacitava tecnicamente para o acompanhamento de obras. O desenvolvimento de projetos nesse escritório era fortemente marcado por uma preocupação material, pela integração entre projeto e estruturas e pela aproximação entre projeto e canteiro.

No retorno ao Brasil, as deficiências sentidas na minha formação com relação ao ensino de estruturas e da aproximação com o canteiro me motivaram a, paralelamente ao exercício da prática profissional em arquitetura, cursar a graduação em Engenharia Civil, na tentativa de obter uma formação complementar que me possibilitasse uma prática profissional próxima da que havia vivenciado na Espanha. O curso de Engenharia Civil não supriu essa demanda, ao contrário, apresentou-se mais abstrato e afastado do canteiro do que o curso de Arquitetura. No decorrer dos anos 2006 e 2015, trabalhei em diversos escritórios de arquitetura⁴ e também como profissional autônoma atuando na prática de projeção, contexto em que, devido ao momento de crescimento econômico do país, várias encomendas, inclusive as de caráter simbólico nos eram demandadas, em um ritmo acelerado de projeto. Uma dessas

⁴ Entre 2013 e 2015, paralelamente ao mestrado, atuei como profissional autônoma desenvolvendo projetos residenciais, predominantemente no desenvolvimento de casas de alto padrão em condomínios fechados, e no desenvolvimento de projetos de interiores. Nos anos de 2007 a 2012, trabalhei como arquiteta colaboradora no escritório B&L Arquitetura, que tinha como característica a atuação em diversas escalas de projeto, ocasião em que pude desenvolver propostas de estudo preliminares, projeto executivo e acompanhamento de obras para projetos comerciais, residenciais, cenografia, infraestrutura e urbanização em várias cidades do Brasil. Entre 2006 e 2007, trabalhei como arquiteta no escritório Arquitetos Associados, notadamente reconhecido por premiações em concursos nacionais de projeto, no desenvolvimento de projetos executivos residenciais e institucionais. Além disso, tive uma breve passagem no ano de 2010, como engenheira *trainee* pela Construtora Caparaó em Belo Horizonte, que atua na construção de edifícios de alto padrão. Anteriormente, havia realizado estágios profissionais nos escritórios D'Ávila Arquitetura, atuante em projetos para o mercado imobiliário, e, no escritório Carico, reconhecido pelo desenvolvimento de projeto de interiores minimalistas para o mercado de alto luxo.

encomendas foi a estação central do BRT⁵ para a cidade de Belo Horizonte, que deveria funcionar também como um símbolo de eficiência e modernidade do sistema de transporte da cidade. Esta estação deveria apresentar certo apelo formal, o que fez com que os sócios do escritório solicitassem à equipe um projeto de formas orgânicas e curvas, em uma referência à arquitetura espetacular que estava sendo produzida em países centrais na primeira década do século XXI. Um dos arquitetos da equipe, que havia trabalhado com Erick van Egeraat, arquiteto cofundador do escritório holandês *Mecanoo*⁶, apresentou-nos a possibilidade de desenvolver o projeto no *software* paramétrico *Grasshopper*. As possibilidades do *software* para a exploração de geometria complexa me levaram a compreender imediatamente que esta ferramenta provavelmente estava sendo utilizada pelos arquitetos do *star system*⁷ para a projeção de formas espetaculares.

A ferramenta nos possibilitou desenvolver o projeto de forma ágil, investigando diversas possibilidades geométricas para a cobertura da estação. No entanto, um incômodo me ocorreu naquele momento: diante de tantas possibilidades que poderiam ser instantaneamente geradas pelo *software*, qual critério iríamos utilizar para definir a forma estrutural ideal? Sem conseguir um parâmetro mais consistente, enviamos para o engenheiro de estruturas uma geometria que intuitivamente julgamos ser suficiente para garantir sua estabilidade, e aguardamos o retorno do projeto acreditando que seria sugerido um dimensionamento mais eficiente com relação aos vãos, à ordenação da malha e às seções transversais. Para a nossa surpresa, o projeto foi validado pelo engenheiro de estruturas tal como enviamos, tendo sido executado sem nenhuma alteração da geometria proposta. Várias dúvidas me ocorreram naquele momento. Será que teríamos encontrado números mágicos

⁵ Sistema de transporte coletivo por ônibus que proporciona mobilidade urbana rápida. Do inglês *Bus Rapid Transit* (BRT).

⁶ O *Mecanoo* é um escritório de arquitetura holandês fundado em 1984 por Francine Houben, Henk Döll, Roelf Steenhuis, Erick van Egeraat e Chris de Weijer. A base de desenvolvimento dos projetos do escritório está calcada na ideia de composição, contraste e complexidade, tendo incorporado as possibilidades digitais de projeção. O *Mecanoo* teve destaque midiático no cenário internacional do campo da arquitetura em decorrência da proeminência tida pela arquitetura holandesa nos anos 1990.

⁷ *Star system* refere-se ao conjunto de arquitetos que alcançaram o status de *Star Architect* entre os anos 1990 e 2000. O termo "*Star Architect*" (ou "*Starchitect*") é utilizado para caracterizar arquitetos alçados à condição de celebridade pela aclamação da crítica e do público em geral, geralmente associado à produção de obras que apresentam um certo grau de novidade vanguardista. O uso do termo data de meados de 2001, cunhado para o arquiteto Frank Gehry na ocasião da construção do Museu de Bilbao. Para Bonner (2012), o *Star Architect* é um indivíduo que gera grande atenção da mídia, envolvendo o público não profissional em um engajamento com o discurso produzido por ele, fabricando uma identidade glamourosa e artificiosa, geralmente desconectado dos avanços da própria disciplina.

para o pré-dimensionamento? Ou o engenheiro, não querendo conflito, respeitou a forma projetada e não se preocupou em analisar possibilidades para um gasto menor de material?

Essa experiência me levou a desenvolver uma pesquisa de mestrado no Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, entre os anos de 2013 e 2015, em que propus testar a possibilidade de desenvolver um projeto estrutural através de processos paramétricos computacionais integrados a *softwares* de análise estrutural. Descobri que o método de projeto denominado “*Performance-based Design*” já estava sendo desenvolvido por alguns profissionais em países centrais, com alguma literatura produzida com relação ao tema⁸. O mestrado em Engenharia de Estruturas, focado em análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), me possibilitou desenvolver um processo de *form-finding* computacional em que a geometria e o pré-dimensionamento da estrutura seriam geradas por uma análise topológica de tensões (APÊNDICE A). O método utilizado foi resultante de um processo de cooperação com meu então orientador, o engenheiro de estruturas e Prof. Ricardo Hallal Fakury⁹, que se engajou na construção de um processo de projeto dialógico em que tanto os parâmetros de arquitetura quanto os parâmetros estruturais faziam parte da síntese arquitetônica (FIG. 01).

⁸ As principais referências utilizadas foram *Performance-based design: current practices and research issues* (2008) e *The New Structuralism: design, engineering and architectural technologies* (2010) ambas desenvolvidas por Rivka Oxman; *Performative Architecture beyond instrumentality* (2005) de Branko Kolarevic; e, *Performatism: Form and Performance in Digital Architecture* (GROBMAN; NEUMAN, 2012).

⁹ O Prof. Ricardo Hallal Fakury é professor titular do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG e atua nas áreas de estruturas de aço, estruturas mistas de aço e concreto, e, estruturas em situação de incêndio. É um dos editores da *Revista da Estrutura de Aço* do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) e atua ativamente na elaboração de normas técnicas para a ABNT relacionadas à sua área de atuação. Atualmente exerce o cargo de Pró-Reitor de Administração da UFMG.

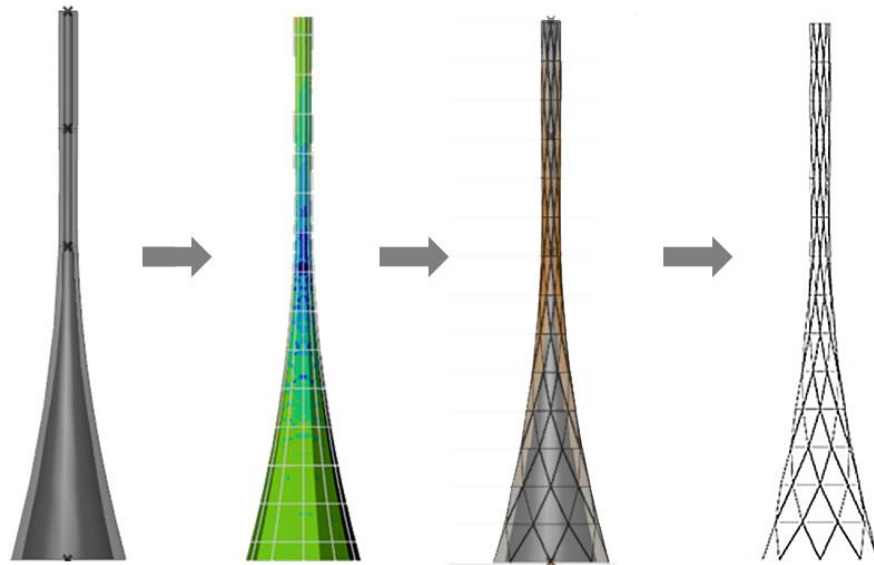


FIGURA 01 - Projeto baseado em *performance* desenvolvido para concepção de estrutura de torre eólica.
Fonte: BORGES, 2015.

A facilidade de manipulação do *software* e as possibilidades de visualização, interação¹⁰ e iteração¹¹ com o comportamento estrutural me estimularam a propor a aplicação deste método para o ensino de estruturas na arquitetura, em que este poderia potencialmente servir como ferramenta para uma prática de projeção tectônica. Tendo feito graduação em Arquitetura, e, posteriormente, em Engenharia Civil, pude perceber por meio da minha experiência pessoal como aluna de graduação de ambos os cursos, e por estudo dos currículos e da análise dos planos de ensino desenvolvidos no primeiro ano do doutorado (APÊNDICE B) que as disciplinas de estruturas ministradas nos cursos de arquitetura tinham a mesma abordagem do percurso formativo dos cursos de Engenharia Civil, cujo enfoque e aplicação profissional não são os mesmos, sendo necessário haver uma revisão das práticas de ensino. O estudo apresentado consistiu em uma análise comparativa do percurso de formação das disciplinas de estruturas nos cursos de Arquitetura e Engenharia Civil da UFMG, em que comparamos, por meio dos planos de ensino disponibilizados, a carga horária, os conteúdos ministrados e as referências bibliográficas. Por meio deste estudo, pudemos explicitar de forma visual que, embora seja realizada a mesma abordagem para o ensino de estruturas, existe uma fragmentação e um consequente esvaziamento do percurso de formação oferecido na Arquitetura com relação ao percurso oferecido na Engenharia Civil,

¹⁰ Para a computação, o termo “interação” se refere à comunicação entre agentes.

¹¹ Para a computação, o termo “iteração” se refere a um ciclo de repetição que tem como objetivo gerar uma correção sucessiva de erros.

não capacitando desta maneira os alunos de arquitetura a desenvolverem as mesmas habilidades relacionadas ao cálculo estrutural. O estudante de engenharia deve desenvolver habilidades quantitativas para sua aplicação ao cálculo e otimização estrutural; enquanto o estudante de arquitetura deve desenvolver habilidades qualitativas e analíticas para a proposição de soluções arquitetônicas de sistemas estruturais. No entanto, com disciplinas de estruturas focadas em aspectos quantitativos, estas são demasiadamente abstratas e não instrumentam os estudantes de arquitetura com ferramentas adequadas para se apropriarem da relação do comportamento do material com o sistema estrutural desenvolvido na prática de projeto.

A ciência moderna e a concepção de ensino disciplinar não conseguem abarcar toda a complexidade requerida para a prática de projeção envolvendo princípios de espacialidade, materialidade e tectônica, demandando uma transformação dos métodos de ensino. Essa transformação demanda uma articulação interdisciplinar entre arquitetura e engenharia, estimulando uma revisão de fronteiras disciplinares entre os dois campos por meio da construção de novos métodos de projeção. Dessa maneira, a proposta deste trabalho foi experimentar possibilidades de uma síntese de projeção arquitetônica através do ensino de projetos conjugado com o ensino de estruturas, testando procedimentos de integração via ferramentas digitais¹² e suas possibilidades teórico-conceituais para a projeção, procurando, assim, suprir as deficiências de aprendizagem que decorrem da fragmentação atual do ensino, buscando interferir positivamente na prática efetiva. A hipótese inicial foi a de que as ferramentas digitais de projeto e análise estrutural pudessem oferecer uma oportunidade de integração dos saberes, por meio das possibilidades de avaliação interativa e iterativa da forma projetada, de tal maneira que o aluno desenvolvesse habilidades de conceber e analisar sistemas estruturais computacionalmente de maneira iterativa, aproximando a relação do projeto com as questões relativas à sua articulação espacial, materialidade e construção.

No entanto, consideramos que a prática de projeção não se limita somente a uma questão

¹² Para Piano (1992 *apud* Frampton, 1995, p. 383), “um arquiteto deve ser um artesão, em que atualmente, as ferramentas podem ser um computador, um modelo experimental ou a matemática, mas ainda assim sendo um artesão”.

técnica, já que a arquitetura é primariamente uma forma cultural e sociopolítica, envolvendo não só questões físicas relativas aos materiais e técnicas de construção, mas também dimensões sociais, culturais, políticas e econômicas. O ato de projetar arquitetônico trata de uma construção social resultante da interação entre agentes e sistemas. Com a consolidação da separação disciplinar da arquitetura e da engenharia no período pós-Revolução Industrial, podemos considerar que esses se tornaram sistemas sociais distintos, cujas interações estabeleceram processos que interferem diretamente no resultado dos produtos arquitetônicos. Dessa forma, para que haja uma reconstrução das práticas de projeção de tal maneira a propiciar uma prática de projeção tectônica, seria suficiente somente revisar os métodos de ensino de projetos e estruturas que julgamos inadequados? Ou seria necessária uma abordagem mais ampla, que considere uma crítica aos mecanismos de produção e reprodução do campo da arquitetura que não privilegiam uma prática tectônica?

Sendo assim, o percurso de estudo desenvolvido nesta tese buscou não somente a investigação de métodos de ensino de estruturas articulados de maneira híbrida com o ensino de projetos, mas também considerar uma investigação sobre os mecanismos de produção e reprodução do campo, buscando estratégias de articulação entre a arquitetura e a engenharia de modo a corrigir trajetórias nocivas resultantes da fragmentação disciplinar. Para tanto, propusemos essa reconstrução por meio do desenvolvimento de relações de conversa entre arquitetos e engenheiros, tendo como objetivo o desenvolvimento de processos dialógicos, provocando entre os participantes uma relação cooperativa, inovadora, ética e responsável, levando a um tensionamento da prática de projeção vigente, deslocando-a para uma prática processual, material e tectônica.

1.1 Percurso do estudo

O percurso deste estudo inicia-se de maneira empírica, com a realização de testes de procedimentos para o ensino de estruturas no ambiente do ensino de projetos, tendo como hipótese que o uso de ferramentas digitais as constituiriam como instrumentos facilitadores para que os alunos desenvolvessem uma prática de projeção tectônica por meio da visualização e interação com modelos computacionais de análise estrutural. No entanto, com o desenvolvimento dos experimentos, essa abordagem foi sendo ampliada para uma revisão

dos mecanismos de produção e reprodução do campo. Assim, a abordagem realizada foi sendo orientada para o desenvolvimento de modelos processuais de ensino de projeção que se aproximam de uma prática de conversação entre arquitetos e engenheiros, buscando desenvolver novas conexões entre projeto e produção.

A concepção da conversação que iremos trabalhar está fundamentada principalmente nos estudos de práticas profissionais reflexivas do filósofo Donald Schön (1987) e na construção e estruturação da conversa aplicada à prática de projeção realizada pelos ciberneticistas Gordon Pask (1976a), Heinz von Foerster (2003), Paul Pangaro e Hugh Dubberly (2009). Donald Schön (1930-1997) foi professor do Massachusetts Institute of Technology (MIT), onde desenvolveu estudos acerca de práticas reflexivas em educação, e, sobretudo, a noção de *reflective action*, produzindo uma epistemologia da prática, da reflexão e do conhecimento na ação para a conceitualização do profissional reflexivo como um paradigma integrador e aberto. Na definição de Schön (1987, p. 35), uma boa conversa é um “processo em que os participantes conhecem e desenvolvem temas cada um emitindo seu repertório de coisas a dizer”¹³ por meio de uma improvisação verbal coletiva, em que em alguns momentos cai em rotinas convencionais, dentro de uma estrutura de trabalho que evolui e, em outros momentos, traz surpresas e mudanças de direções que exigem dos participantes reações imediatas. Para Schön (1987), o projeto arquitetônico trata-se de uma conversa reflexiva, uma representação de algo a ser trazido para a realidade, envolvendo complexidade e síntese, e exigindo de seus praticantes, habilidades para gerenciar situações de incerteza, instabilidade e conflitos de valores.

A definição de *professional reflexivo* desenvolvido por Schön (1987) traz uma perspectiva de uma nova epistemologia da prática, embasada pelos conceitos de *conhecer-na-ação* e *reflexão-na-ação*. O processo de *conhecer-na-ação* está relacionado a um conhecimento tácito, ou seja, ao saber-fazer, ao conhecimento que surge na ação. Dessa maneira, a reflexão se revela a partir das situações produzidas pela ação. Para Schön (1987), a reflexão acontece em níveis distintos, ocorrendo não somente a *reflexão-na-ação*, mas a *reflexão sobre a ação* e a *reflexão sobre a reflexão-na-ação*. A *reflexão-na-ação* é o ato de refletir enquanto a ação está acontecendo, interferindo na situação em desenvolvimento, mas sem interrompê-la. A

¹³ Tradução nossa.

reflexão sobre a ação refere-se a pensarmos retrospectivamente sobre os atos realizados, buscando no processo de *conhecer-na-ação* os elementos que contribuíram para o resultado. Já, a *reflexão sobre a reflexão-na-ação* consiste em pensar sobre as reflexões passadas, consolidando epistemologicamente a compreensão de uma determinada situação, para que assim possam ser desenvolvidas novas estratégias de ação.

Os conceitos de prática reflexiva desenvolvidos por Schön (1987) estão intrinsecamente relacionados com a concepção da teoria cibernética e seus princípios de circularidade e recursividade. De acordo com o ciberneticista Heinz von Foerster¹⁴ (2003), a abordagem de Schön (1987) se trata de uma ação cibernética explícita, que se constitui de um ato cibernético dos sistemas observados¹⁵, em que são desenvolvidas noções de *feedback*, circularidade e recursão.

A Teoria Cibernética¹⁶ foi proposta pelo matemático Norbert Wiener na década de 1930, e surge juntamente com a Teoria Geral dos Sistemas como retomada de uma compreensão holística aristotélica em contraposição à segmentação dos saberes e da ideia de especialização trazida pela modernidade. A teoria cibernética se divide entre dois momentos históricos, a abordagem de primeira-ordem concebida na década de 1950, e a abordagem de segunda- ordem, originada nos anos 1970. A cibernética de primeira-ordem traz uma compreensão de causalidade circular para a compreensão de sistemas interativos que envolvem recursão, aprendizagem e coevolução. Já a abordagem trazida pela cibernética de segunda-ordem, consiste na inclusão do observador do sistema em sua observação, incluindo assim valores relacionados à epistemologia, ética e autonomia.

A cibernética de segunda-ordem, e mais especificamente pela abordagem trazida pela Teoria da Conversação desenvolvida pelo ciberneticista Gordon Pask¹⁷ (1976a), enquadra o *design*

¹⁴ O ciberneticista Heinz von Foerster (1911-2002) estudou física na Universidade Técnica de Viena e na Universidade de Breslau, onde recebeu um doutorado em física em 1944. Seu trabalho sobre cognição é baseado em neurofisiologia, matemática e filosofia, tendo sido influenciado pelo Círculo de Viena e pela abordagem de Wittgenstein. É considerado um dos fundadores da cibernética de segunda-ordem.

¹⁵ Conceituação da cibernética de primeira-ordem (FOERSTER, 2003)

¹⁶ A palavra “cibernética” vem do grego e significa timoneiro, ou seja, aquele que controla a navegação, realizando holisticamente ações para a condução do barco e reagindo às adversidades.

¹⁷ Andrew Gordon Pask (1928-1996) foi ciberneticista, psicólogo e teórico da educação, desenvolvendo pesquisas epistemológicas experimentais com tecnologias educacionais tendo ênfase no processo de

como uma conversação, e desta forma, requer tornar os valores e os pontos-de-vista explícitos, incorporando assim subjetividade e epistemologia, criando condições para que os participantes aprendam juntos (DUBBERLY; PANGARO, 2015a). Para Pask (1987) uma conversa é uma interação lingüística ativa entre os atores, ou participantes, na qual os conceitos pessoais são trocados e em parte compartilhados¹⁸ por meio de uma linguagem comum, consistindo em um processo dialético aberto a questionamentos e investigações, o que se diferencia do discurso, que possui a intenção de convencimento ou imposição de ideias. Esses atores não são necessariamente indivíduos, eles podem ser também caracterizados como sistemas, podendo ser, inclusive, máquinas ou sistemas sociais.

A cibernética estuda como os sistemas se organizam, tratando de como estes se comunicam internamente e com outros sistemas, o que propicia um pensamento transdisciplinar colaborativo, sendo este inclusive, estimulado. Para Von Foerster (apud DUBBERLY; PANGARO, 2015b, p.5) “alguém pode e deve tentar comunicar cruzando as fronteiras, e muitas vezes os abismos, que separam as várias ciências”¹⁹.

Na Teoria da Conversação (PASK, 1976a), a linguagem comum é tratada como um elemento central, em que, através de um meio de processamento, os participantes podem questionar, comandar, responder, obedecer e explicar um determinado objetivo, havendo um compartilhamento de conceitos entre participantes em uma “intersecção entre dois sistemas de segunda-ordem, nos quais humanos, máquinas e ambientes podem estar engajados em trocas de informação colaborativas”²⁰. Para Foerster (2003), a linguagem atua em duas faixas distintas, uma da aparência e a outra do diálogo. Quando a linguagem está atuando na faixa da aparência, ela se constitui como um monólogo, e quando atua na faixa da função, é

aprendizagem enquanto um acordo consensual entre atores, o que resultou em sua Teoria da Conversação (1976b). Pask formou-se mestre em Ciências Naturais pela Universidade de Cambridge e doutor em Psicologia pela Universidade Livre do Reino Unido. O pensamento de Pask enfatiza o raciocínio circular, a auto-regulação e a auto-organização. Em seu artigo “*an*”, Pask (1969) defende que os conceitos da cibernética podem ser interpretados em termos arquitetônicos, enfatizando a importância da compreensão da arquitetura como uma compilação de sistemas ativos em que a cibernética se constitui como uma lógica do pensamento computacional para perceber a arquitetura como um meio e um dispositivo ambiental, social e cultural.

¹⁸ No original: “*What do I mean by a conversation? Well, first of all a conversation is an active linguist interaction between actors, namely, participants (such as you and I) by whom personal concepts are exchange and in part, shared*” (PASK, 1987, p. 19)

¹⁹ Tradução nossa.

²⁰ Tradução nossa.

dialógica. Em sua função a linguagem é construtiva; no entanto, a construção do monólogo é de ordem descritiva, enquanto no diálogo é conotativa. O monólogo apresenta uma construção discursiva fechada para a interferência do outro, enquanto o processo dialógico, sendo conotativo, possui o atributo de possibilitar associações linguísticas de diversos tipos, podendo se constituir desta forma enquanto um processo dialético.

Pask (1976a) explicitou a aproximação da arquitetura com a cibernética sugerindo uma interpretação dos conceitos por meio da projeção arquitetônica, interpretação essa que fundamenta o trabalho desenvolvido por Ranulph Glanville²¹, Paul Pangaro²² e Hugh Dubberly²³. Glanville (2007) afirma que “conversa o   design e design   conversa o”²⁴. Desta maneira, tendo como referência os conceitos desenvolvidos por Sch n (1987) e pelos ciberneticistas citados, propusemos abordar a prática de proje o enquanto uma prática dialógica, composta pelas etapas de análise, síntese e avalia o conforme a abordagem de Bryan Lawson²⁵ (1997). A análise   o que d  estrutura e ordena o problema por meio da explora o das rela oes, buscando por padrões nas informaçoes disponíveis e na classifica o do objetivo. Síntese   uma tentativa de dar uma resposta para o problema e gerar soluçoes. Avalia o envolve a aprecia o crítica das soluçoes sugeridas levando em conta os objetivos identificados na fase de análise. Sendo assim, o processo de análise e síntese envolve movimentos em um ciclo iterativo, bem como em um processo de conversa o.

Consideramos, assim, que a abordagem de Lawson (1997)   uma referência fundamental para a reconstru o das rela oes entre arquitetos e engenheiros, uma vez que, considerando as etapas de projeto estabelecidas na prática colaborativa vigente, a participa o do engenheiro geralmente não ocorre dentro desse ciclo iterativo, mas acontece quando este já   dado

²¹ Ranulph Glanville (1946-2014) foi arquiteto e doutor em Cibernética e Aprendizagem, tendo sido professor da Universidade de Portsmouth e professor de pesquisa em “*innovation Design Engineering*” no Royal College of Art em Londres.

²² Paul Pangaro   Doutor em Cibernética e graduado em Ciências, Humanidades e Ciência da Computa o. Atualmente   professor de prática do Human-Computer Interaction Institute da Universidade Carnegie Mellon.

²³ Hugh Dubberly   designer pela Escola de Design de Rhode Island e pela Universidade de Yale. Atualmente   diretor do *Dubberly Design Office* em São Francisco, Estados Unidos.

²⁴ Tradu o nossa.

²⁵ Bryan Lawson   graduado em arquitetura pela Universidade de Oxford e obteve seu doutorado pela Universidade de Aston. Atualmente   professor emérito da Universidade de Sheffield, onde já foi reitor da Faculdade de Arquitetura. Seu grupo de estudo foi pioneiro no desenvolvimento de *softwares* aplicados a arquitetura na década de 1980.

como finalizado, não permitindo uma interação dialética entre agentes de tal maneira a possibilitar uma orientação tectônica para a prática de projeção.

1.1.1 A conversação como método

Para a construção da tese, buscamos inicialmente fundamentar o motivo pelo qual acreditamos ser importante a reconstrução das relações entre arquitetos e engenheiros e *porque* essa reconstrução deve ser orientada para a construção de relações de conversa. Posteriormente, procuramos de maneira prático-reflexiva explorar, através de experimentos com disciplinas híbridas de projeto e estruturas, o modo *como* essas relações de conversa poderiam ocorrer no ensino. E, por fim, acreditando que a revisão do ensino pode suscitar em uma revisão do exercício profissional, procuramos investigar de forma crítica o impacto que as relações de conversa podem ocasionar na reconstrução das práticas de projeção vigentes e na relação entre agentes, de tal maneira a propiciar uma reorientação processual, social e cultural voltadas para a construção de processos mais democráticos.

O Capítulo 2, *POR QUE CONVERSAR* procurou desenvolver uma problematização da construção social na qual está fundamentado o processo de projeto arquitetônico e a relação entre arquitetos e engenheiros. Para tanto, foram primeiramente analisados os mecanismos de produção e reprodução do campo da arquitetura e, posteriormente, a interferência desses mecanismos na construção das relações entre arquitetos e engenheiros. Após o estabelecimento desse panorama, foi apontado como as ferramentas digitais de projeção têm interferido nesses mecanismos, e, conseqüentemente, nas relações entre arquitetos e engenheiros – primeiramente, de maneira conservativa, ou seja, conservando os mecanismos de produção e reprodução vigente, e, posteriormente, apontando brechas trazidas pelas ferramentas digitais para uma reconstrução dos processos de projeção de uma forma não conservativa, de maneira a reorientar as práticas para uma abordagem material, tectônica e cooperativa.

Considerando o potencial do ensino para manter ou reconstruir os mecanismos de produção e reprodução do campo, o Capítulo 3, *COMO CONVERSAR*, tratou, em sua primeira parte, de uma construção que buscou identificar e analisar de maneira reflexiva os métodos mais

tradicionais utilizados para o ensino de estruturas nos cursos de arquitetura, que consistem dos métodos analítico e experimental. Uma terceira possibilidade, que consiste no método computacional, foi apresentada. Neste caso, o computador atua como um instrumento cibernético que responde aos parâmetros estabelecidos pelos estudantes para a concepção do sistema estrutural, instruindo-o e sendo instruído por ele, em um processo recursivo que pode agregar quantos agentes forem necessários. Nesse processo, podem emergir resultados inesperados, não previstos inicialmente, criando novidade para ambos os participantes. Para elucidar isso, foram relatadas experiências de hibridização do ensino de projetos e estruturas realizadas nas universidades de Berkeley, Harvard em parceria com o MIT, e Universidade de Zurich, tendo em comum as ferramentas digitais como elementos facilitadores para a interdisciplinaridade.

Na segunda parte do Capítulo 3, foram demonstrados os experimentos realizados por meio da oferta de disciplinas híbridas nos cursos UFMG²⁶ e na PUC Minas²⁷ entre 2016 e 2018, como objeto de investigação e experimentação das potencialidades das relações de conversa entre arquitetos e engenheiros posta neste trabalho. Como hipótese inicial, estas relações

²⁶ O curso de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Arquitetura da UFMG foi fundado em 1930, tendo sido o primeiro curso autônomo de Arquitetura no Brasil. Ao final dos anos 1940, a escola foi federalizada, juntando-se à Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente, existem duas propostas pedagógicas, uma para o turno diurno e outra para o noturno. O curso diurno, tradicionalmente consolidado com ênfase na formação de profissionais mais voltados para atuação em projetos de edificações, no entanto, mantém-se aberto aos vários enfoques que a área pode propiciar, principalmente às relacionadas com o Urbanismo. O curso diurno está distribuído em quatro eixos: área de história e teoria da arquitetura, das artes e do urbanismo articulada às áreas de ciências humanas e artes; área de tecnologia da arquitetura e urbanismo, articulada às engenharias, ciências da terra e estudos ambientais; área de urbanismo, articulada às ciências sociais, geográficas e ambientais; e área de projeto arquitetônico, urbanístico e paisagístico. O novo curso noturno de Arquitetura e Urbanismo, implantado dentro do programa do governo federal REUNI (Programa de Reestruturação e Expansão das Universidades) em 2009, assume um enfoque na área de habitação em interesse social e planejamento urbano. A estrutura pedagógica é bastante interdisciplinar apoiada em oficinas integradas de Arquitetura, Urbanismo, Paisagismo e Tecnologia, e Planejamento Urbano e Habitacional, havendo dois grandes eixos para trabalhar os conteúdos teóricos de fundamentação: Oficinas integradas de Arquitetura, Urbanismo, Paisagismo e Tecnologia (OFIAUP) e Oficinas de Planejamento Urbano e Habitacional (OFIURB). Ambos os cursos ressaltam a interdisciplinaridade como um importante objetivo, ressaltando também a abertura de novos encontros disciplinares através do incentivo ao contato com as várias áreas e cursos oferecidos pela Universidade e às atividades complementares.

²⁷ O ensino de estruturas do curso da PUC Minas é focado em métodos experimentais, tendo uma orientação para um ensino de estruturas qualitativo realizado no ambiente de projetos. O atual projeto pedagógico do curso foi implantado em 2008, em que, dentre as principais mudanças curriculares, destaca-se a abordagem das questões tecnológicas na arquitetura, sobretudo no que diz respeito às questões estruturais e construtivas. O projeto pedagógico propõe que o ensino e aprendizado das estruturas ocorram por meio de ateliês de projeto, onde os conhecimentos de engenharia são direcionados à aplicação com ênfase em exercícios projetuais, evitando a complexidade das diversas dimensões de um projeto arquitetônico (funcionais, estéticas, culturais etc.), de modo a permitir a abordagem de conteúdo teórico e de sua aplicação prática, seja por meio do projeto ou de simulações e protótipos (PUCMG, 2008).

ocorrerem por meio de uma conversa *homem-máquina*, em que os estudantes de arquitetura explorariam as possibilidades de visualização, interação e iteração com *softwares* de análise estrutural. No entanto, essa possibilidade se expandiu ao longo dos experimentos para uma conversa *homem-máquina-homem*, processo em que o *software* de análise estrutural se tornou uma linguagem comum entre estudantes de arquitetura e engenheiros para a seleção de parâmetros estruturais que informaram a síntese projetual.

Ao todo, foram selecionados 7 (sete) experimentos realizados no ensino de projetos, e efetivados das mais diversas formas, sendo, em ordem cronológica, os experimentos 1 (*Projetos em Estruturas de Concreto Armado*) e 5 (*Projetos em Estruturas de Metal e Madeira*) realizados por meio de disciplinas híbridas de projeto e estruturas já existentes no currículo da PUC Minas; os experimentos 2 (disciplina optativa *Arquitetura e Concepção Estrutural Digital*) e 6 (disciplina *Articulação Espacial e Flexibilidade Estrutural*) como disciplinas de projeto propostas na UFMG, sendo a 2 uma disciplina optativa para o curso noturno e a 6 como uma proposta de PFlex²⁸ para o curso diurno; o experimento 3 (módulo *Open Building e Form-finding estrutural*) enquanto um módulo da disciplina Oficina Integrada de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo (OFIAUP) - Parcelamento e Assentamentos Habitacionais do curso noturno da UFMG; o experimento 4 (*Oficina de Formas Ativas*) como uma oficina para a Semana de Arquitetura da PUC Minas; e o experimento 7 (*Arquitetura-High Low*) como uma orientação de TCC.

Como método de observação e reflexão dos experimentos foi utilizada a concepção de Schön (1987) do processo de *experimentação-na-ação*, que consiste em um processo de *conhecer-na-ação* baseado em trocas dinâmicas que transformam intenções em ações por meio de processos de *reflexão-na-ação*, *reflexão sobre a ação* e *reflexão sobre a reflexão-na-ação*. Esta construção do processo de observação e reflexão sobre os experimentos constituiu-se de três níveis:

²⁸ A proposta de ensino de Projetos Flexibilizados (PFlex) realizado no curso de Arquitetura e Urbanismo diurno da UFMG constitui-se em um percurso não linear de aprendizagem da prática de projeção, em que o aluno pode escolher a disciplina de projeto que deseja cursar no semestre, de acordo com a proposta apresentada pelo professor.

1. Observação dos experimentos

A observação dos experimentos consistiu na construção de um modelo de *conhecer-na-ação* seguido por uma análise e reflexão realizada por meio de um modelo de *reflexão-na-ação*, constituindo-se como um sistema de autorregulação cibernética. Para a construção do modelo de *conhecer-na-ação*, foram utilizados os elementos propostos pelo modelo de conversação cibernética desenvolvido por Pangaro (2009), em que foram analisados contexto, linguagem, acordo, engajamento e o processo de ação e transação desenvolvido pelos participantes. Já o modelo de *reflexão-na-ação*, que também utilizou a abordagem desenvolvida por Pangaro (2009), tratou-se de uma reflexão realizada concomitantemente com a realização dos experimentos, gerando um processo autor regulatório suscitado pela reflexão sobre os objetivos estabelecidos, o processo desenvolvido e a linguagem sugerida, buscando identificar os elementos que deveriam ser evitados, mantidos ou potencializados para o estabelecimento de novas ações que poderiam ser postas para a construção dos próximos experimentos;

2. Reflexão sobre os experimentos observados

O segundo nível de observação consistiu em um processo de *reflexão sobre a ação*, caracterizando-se como um sistema de aprendizagem, em que se buscou medir os efeitos dos primeiros sistemas (experimentos realizados) procurando ajustar seus objetivos e metas, bem como os objetivos do próprio sistema de aprendizagem. Para este processo foi proposto identificar, com base na abordagem de Schön (1987), quais experimentos se constituíram enquanto *experimentos exploratórios*, *teste de movimento* ou *teste de hipóteses*. Esta construção foi importante para identificar o papel que cada experimento exerceu para a construção epistemológica do trabalho, possibilitando, desta maneira, a construção de um terceiro nível de observação;

3. Reflexão para novos experimentos

O terceiro nível de observação dos experimentos constitui-se como um processo de

reflexão sobre a reflexão-na-ação, que consiste ciberneticamente na saída de um sistema de aprendizagem que servirá para as entradas que construirão um novo sistema de aprendizagem. Para tanto, foi utilizado o modelo de autorregulação do sistema construído para os processos de *reflexão-na-ação*, de maneira a gerar apontamentos para o desenvolvimento de ações futuras baseado nas reflexões oriundas do sistema de aprendizagem. Estas ações constituíram-se da seleção de procedimentos que apresentaram maior potencial para o desenvolvimento das relações de conversa entre arquitetos e engenheiros no ensino de projetos. Sendo assim, o processo de experimentação em seus três níveis constitui em uma construção de um sistema de aprendizagem autorregulado. Esta reflexão suscitou uma abordagem mais ampla oriunda do processo de aprendizagem que foi desenvolvida no Capítulo 4;

Dessa forma, o Capítulo 4, A CONVERSA EXPANDIDA, refere-se a uma reflexão epistemológica sobre os impactos que a reconstrução da relação entre arquitetos e engenheiros pode suscitar no setor da construção civil. Essa reflexão foi ancorada nos preceitos da teoria crítica da tecnologia desenvolvida por Andrew Feenberg²⁹ (2013), buscando desenvolver uma abordagem para a conversa na prática de projeção para além dos princípios de racionalidade instrumental existentes nos procedimentos conservativos. Essa abordagem buscou identificar as possibilidades de reconstrução dos mecanismos de produção e reprodução do campo por meio da construção de um código técnico tectônico que revise as fronteiras disciplinares entre arquitetura e engenharia, levando potencialmente à construção de novos modelos de projeção. Para tanto, finalizamos o trabalho com uma reflexão sobre o papel da universidade para a construção de processos de projeto abertos e inclusivos, de forma que estes propiciem a construção e a potencialização de trajetórias tecnológicas inovadoras e democráticas.

²⁹ Andrew Feenberg é filósofo e pesquisador marxista do campo dos Estudos Sociais de Ciência e Tecnologia, atualmente professor de Filosofia da Tecnologia na Universidade Simon Fraser, de Vancouver, Canadá. Foi aluno de Herbert Marcuse na Universidade de Berkeley nos anos 1960. Marcuse tinha como questão central interpretar filosoficamente a tecnologia considerando, para além das opções econômicas, a cultura e a subjetividade. A obra de Feenberg apresenta uma herança da obra de Marcuse com relação a uma crítica aos sistemas técnicos, e propõe uma abertura da caixa-preta dos códigos técnicos no sentido de resgatar valores democráticos e corrigir trajetórias tecnológicas nocivas.

2 PORQUE CONVERSAR

2.1 Mecanismos de produção e reprodução do campo da arquitetura

A divisão do trabalho entre arquitetura e engenharia decorrente da instauração de um modo de produção parcelado, e, conseqüentemente, como esta divisão se impõe sobre o modo como estas disciplinas se diferenciam e se organizam, começa a existir no período pós-Revolução Industrial, quando a Engenharia Civil se torna uma disciplina autônoma da Arquitetura. A disciplina da Engenharia Civil se fundamentou na demanda do capital por um alto grau de especialização para lidar com novos materiais (ferro, aço e concreto armado), nas novas bases científicas de cálculo e no domínio das novas técnicas construtivas. Entre os séculos XV até meados da metade do séc. XVIII, as duas disciplinas eram indistinguíveis uma da outra. O título de arquiteto ou engenheiro dependia do tipo de projeto em questão, em que a distinção das duas profissões refletia as técnicas de construção que eram empregadas, e não as habilidades de projeto. Com a separação, ocorreu uma crescente institucionalização da divergência de práticas, métodos e ferramentas entre a prática de projeção da Arquitetura e da Engenharia.

No final do séc. XVIII iniciou-se na Europa um processo de transformação dos meios de produção, no qual a manufatura artesanal³⁰ foi gradativamente substituída pela produção por máquinas. O desenvolvimento de novas técnicas e de novos materiais como concreto, o ferro e os avanços na produção do vidro, passaram a impor uma lógica econômica da eficiência e

³⁰ A manufatura artesanal consiste em um modo de produção em que a lógica organizativa do canteiro é manufatura, mas a prática dos trabalhadores é artesanal.

da rentabilidade também ao canteiro de obras, o que fez com que os novos conhecimentos científicos que permitiam o aproveitamento dos materiais até o limite de sua resistência fossem incorporados às práticas de projeção. O ferro, antes utilizado apenas para tarefas acessórias, tornou-se um material fundamental para a construção de grandes vãos. A indústria do vidro também fez grandes progressos técnicos, e começou-se a experimentar no início do séc. XIX a associação com o ferro para se obter grandes vãos de cobertura translúcida, permitindo a exploração de novas formas potencializadas pelo avanço da matemática e do cálculo estrutural.

Entre os séculos XVII e XVIII, verificou-se um grande avanço da matemática e do cálculo estrutural com os estudos de Hooke sobre elasticidade, Leibniz, Mariotte e Bernoulli sobre a flexão, e Coloumb sobre torção. A difusão do espírito científico, sua aplicação aos materiais e sistemas de construção, e as pressões por rentabilidade advindas do mundo do trabalho, estimularam o desenvolvimento de várias pesquisas experimentais envolvendo a resistência dos materiais. A pesquisa científica transformou os instrumentos de projeto; além do cálculo estrutural, a invenção da geometria descritiva e a introdução do sistema métrico modificaram o sistema de representação. O sistema métrico passou a fornecer as técnicas de construção um instrumento de precisão, com exigências cada vez mais rigorosas. O espírito científico incorporado ao projeto, o desenvolvimento do cálculo estrutural, e principalmente as pressões por eficiência e lucro impostas ao canteiro, foram um ponto de conflito e crise na profissão.

A França no séc. XVIII estava na vanguarda do progresso técnico-científico e servia como modelo às outras nações quanto à organização didática. De acordo com Benevolo (1976), o ensino de arquitetura competia à *Académie d'Architecture*³¹, reconhecida por ser a guardiã da tradição clássica francesa. Até então, essa instituição se mantinha aberta aos avanços científicos e às teorias racionalistas. No entanto, as questões pragmáticas do projeto baseadas na ciência se tornaram tão amplas e complexas que foi necessária a formação específica de engenheiros estruturais para suprir a demanda que estava sendo criada. Com a

³¹ A *Académie d'Architecture* foi fundada em 1671, mas em 1916 foi transformada em *Académie de Beaux-Arts*, juntamente com a *Académie de Peinture et de Sculpture*, e *Académie de Musique*. De acordo com Benevolo (1976), com a supressão da Academia, quem quisesse se dedicar à Arquitetura e ser chamado de arquiteto, independentemente dos estudos feitos, poderia fazê-lo mediante o pagamento de uma taxa.

demanda do Estado por profissionais exercendo tarefas cada vez mais técnicas, a Academia, de tradição humanista, opta por não formar técnicos puros, e com isso, em 1747 funda-se primeiramente a *École des Ponts et Chaussées*, onde o ensino fundamenta-se somente em bases científicas, passando a formar uma grande massa de projetistas.

Para Garry Stevens³² (2003), a Revolução Industrial trouxe novas tensões para o desempenho profissional dos arquitetos, em que esses foram confrontados com as demandas de tipologias tais como fábricas ou estações ferroviárias, que nada tinham a ver com a tradição clássica, tendo a projeção dessas edificações sido absorvidas pela projeção dos engenheiros, que começaram a atuar de forma autônoma em projetos que empregavam principalmente ferro e aço para obras de infraestrutura. O trabalho dos engenheiros da época, segundo Benevolo³³ (1976), foi o de criar modelos e recursos para uma abordagem de projeto que levava em consideração somente o material, a função e a economia de recursos. No entanto, a estética adotada pelos engenheiros também foi um fator relevante, tendo tido raízes profundas numa estética clássica adotada para o estilo arquitetônico neoclássico³⁴, o que também desenvolveu uma cultura visual no campo da engenharia³⁵. Nestes projetos a lógica formal foi

³² Garry Stevens é arquiteto e sociólogo com desenvolvimento de pesquisas sobre projetos arquitetônicos e em sociologia da arquitetura. Em *O Círculo Privilegiado* (2003) ele retrata as relações entre a arquitetura e os privilégios sociais ancorada nas ferramentas conceituais do sociólogo Pierre Bourdieu.

³³ Leonardo Benevolo (1923-2017) foi arquiteto e historiador italiano.

³⁴ O neoclassicismo procurava legitimar as formas arquitetônicas, pelas leis da beleza clássica ou através de discursos que evocavam princípios morais através da arte e do seu posicionamento político. A efetiva aproximação do projeto arquitetônico com a engenharia e os novos materiais industriais ocorreu de maneira mais consolidada no estilo neogótico, quando se incorporou aos discursos questões relativas à sinceridade construtiva e econômica. O neogótico exaltava no gótico o modo de se trabalhar o limite do esforço máximo do material, limite este que com o desenvolvimento do cálculo estrutural poderia ser alcançado de maneira mais precisa. O desenvolvimento do estilo neogótico conseguia uma coincidência formal com as estruturas metálicas, numa tentativa de superar o afastamento inevitável das competências entre engenheiros e arquitetos. Enquanto para a cultura neoclássica a engenharia desempenhara um papel subalterno na construção, limitando-se ao esqueleto do edifício, ao cálculo e ao dimensionamento de vigas e colunas, para a cultura neogótica a forma arquitetônica poderia ser essencialmente uma forma estrutural (PATTETA, 1997). Viollet le Duc (1814-1879) foi um dos arquitetos responsáveis pela idealização do neogótico, onde interpretava a estrutura de uma catedral gótica como um ser orgânico. Pensar o edifício enquanto um organismo vivo levava a conceber o projeto estrutural enquanto um conjunto de nervos, juntas e confluência de esforços e cargas nos nós estruturais, levando os materiais a serem trabalhados no limite dos esforços máximos, verificados através do cálculo estrutural. Le Duc defende o uso apropriado dos materiais, propondo que o ferro seja usado de acordo com suas características, e não substituindo materiais tradicionais. Para ele, o ético e o estético relacionados à cultura e à economia levavam a uma estética empírica. Essa estética envolvia experiências dos princípios estruturais e a relação da arquitetura com a sociedade, civilismo e caráter de nação em seus pressupostos, onde a discussão da moral deveria ser tão importante quanto a discussão da técnica.

³⁵ Nas escolas de engenharia procurou-se desenvolver uma cultura técnica associando o gosto clássico com a prática de construir. Para Benevolo (1976) embora não possuíssem a mesma elaboração teórica, era o grupo da vanguarda, pois sua influência impactou diversos arquitetos ao longo do séc. XX. Durant (1760-1834) ministrou o

celebrada enquanto pressuposto estético (FIG. 02), consistindo numa expressão visual da tecnologia de construção da época, assim como declarou Gottfried Semper de que “o ornamento não necessita seguir a forma da estrutura ou imitá-la, o ornamento é a estrutura”³⁶ (POGACNIK, 2012, p. 22, tradução nossa).

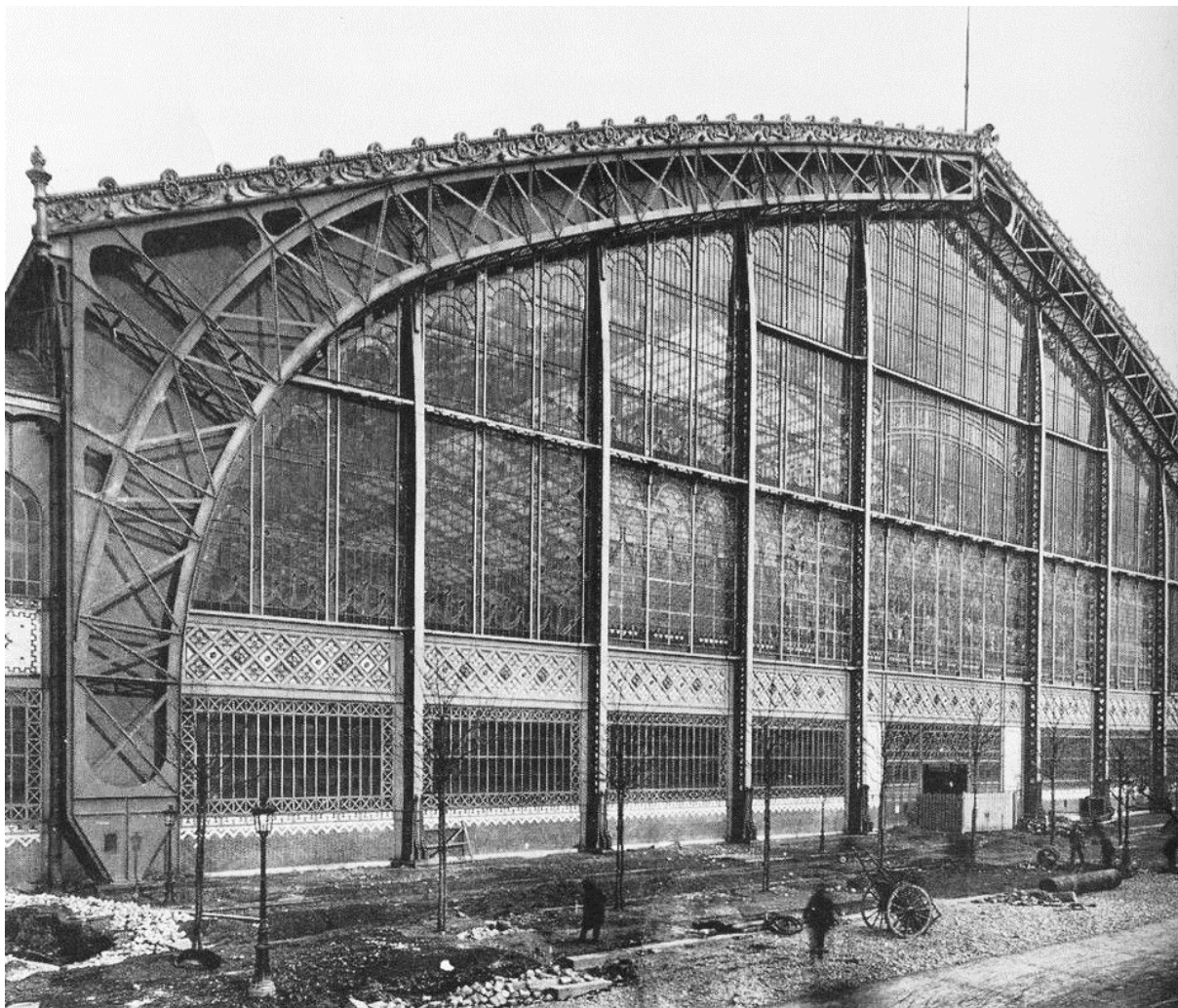


FIGURA 02 - Exemplo da estética estrutural desenvolvida no séc. XIX - Galerie des Machines projetada pelo arquiteto Ferdinand Duterd (1945-1906) em colaboração com o engenheiro Victor Contamin (1840-1893) e construída para a Exposição Universal de Paris em 1889.

curso de arquitetura na *École Polytechnique* a partir de 1795, onde adotava um raciocínio de projeto rigorosamente lógico, baseado na ciência e articulado com a indústria recém-implementada. Durant acreditava em formas relacionadas a uma síntese de conceitos construtivos advindos da história e de métodos científicos derivados da natureza dos materiais em que a beleza derivaria da coerência dos sistemas estruturais. Em seu tratado *Compêndio das Lições em Arquitetura* (1805), escreve uma espécie de tratado sobre as formas clássicas, descrevendo um método de aplicação, onde seria possível vários tipos de combinações dos elementos, em que propõe um sistema de classificação para sistematizar a organização dos partidos e os novos materiais. As figuras do tratado são facilmente identificáveis pela grafia conforme o gosto da época, e prenunciam dessa maneira toda a produção dos engenheiros do séc. XIX, sendo essas características encontradas mais tarde nas obras em aço de Eiffel e de concreto armado de Hennebique.

³⁶ No original: “The ornament does not need to follow the form of the structure, or to imitate it. The ornament itself becomes the structure.”

Fonte: POGACNIK, 2012.

No início do séc. XIX, ocorreu a formação de associações profissionais com o objetivo de diferenciar a arquitetura da prática da construção, tendo essa formalização da arquitetura como profissão ocorrido também no ensino. A pupilagem desenvolvida nas corporações de ofício foi substituída pelo ensino institucional, que adotou o método *Beaux Arts* como um processo racional de projeção que possibilitava que a prática pudesse ser formalmente ensinada. O currículo *Beaux Arts* foi desenvolvido pela *École des Beaux-Arts*, em Paris, a partir da década de 1830 até ao final do século XIX como um estilo acadêmico de ensino de projeto arquitetônico. Seus princípios estavam fundamentados no neoclassicismo francês, mas também incorporava elementos góticos e renascentistas, além de utilizar materiais modernos, como ferro e vidro.

Para Stevens (2003), o currículo *Beaux Arts* preservou o papel do arquiteto como o de um especialista na elaboração de códigos estéticos, estando seus mecanismos de produção e reprodução vinculados ao *status* social e a privilégios socioeconômicos, em que a construção destes mecanismos se fundamenta na posse de capitais simbólicos de seus praticantes (FIG. 03). O capital simbólico ao qual Stevens (2003) faz referência está fundamentado nos conceitos desenvolvidos pelo sociólogo Pierre Bourdieu³⁷ (1980), que classifica as formas de capital que os indivíduos podem acumular. Esses capitais são distinguíveis entre simbólico e econômico, sendo o capital simbólico composto por capital cultural e social, podendo ser convertível em capital econômico.

A noção de capital social refere-se, para Bourdieu (1980), à posse de uma rede durável de relações e vinculação a um grupo, baseada em trocas materiais e simbólicas, cujo estabelecimento e perpetuação supõem a legitimidade desta proximidade. A quantidade de capital social está relacionada à extensão da rede de relações que um indivíduo pode mobilizar, e, à quantidade de capital que os indivíduos da rede possuem. Sendo assim, as trocas realizadas pelos indivíduos representam um signo de reconhecimento mútuo e definem os limites de alcance do grupo, isto é, os limites em que as trocas não podem

³⁷ Pierre Félix Bourdieu (1930-2002) foi um sociólogo francês, docente na École de Sociologie Du Collège de France. Seu trabalho é caracterizado pela abordagem sociológica dos conceitos de campo, *habitus* e capital, além de ter estudado o rebatimento desses conceitos nos mecanismos escolares de reprodução cultural e social.

ocorrer, em que o grupo favorece as trocas legítimas e exclui as ilegítimas.

O capital cultural refere-se à apropriação de bens simbólicos pelos indivíduos e se configura em três formas distintas: no estado incorporado, no estado objetivado e no estado institucionalizado. O capital cultural no estado incorporado é aquele adquirido pelo *habitus*³⁸, transmitido no ambiente doméstico, constituindo-se de atitudes, gostos, preferências e comportamentos. No estado objetivado, o capital cultural está relacionado com a posse de bens materiais (objetos ou bens culturais) sendo transmissível somente na condição material, mas não sua condição de apropriação incorporada. No entanto, para obter a posse material de capital cultural objetivado é necessário capital econômico, que para sua apropriação simbólica pressupõe que o indivíduo possua capital cultural incorporado. Já o terceiro estado do capital cultural, o estado institucionalizado, trata-se de uma aquisição por meio das qualificações acadêmicas, podendo ser convertida em benefícios materiais e simbólicos, que podem significar a aquisição de capital econômico e dos demais capitais culturais. Para Stevens (2003), a elite do campo da arquitetura está em uma posição muito diferente da massa de praticantes devido à variação da quantidade de capitais simbólicos existente entre eles. As expressões “arquitetos eminentes” e “arquitetos subordinados” são utilizadas para diferenciar aqueles que atuam de forma autônoma numa esfera de projetos que exigem grande capital simbólico, daqueles que têm uma atuação secundária, geralmente desenvolvendo projetos relacionados ao mercado de massa.

Os arquitetos eminentes atuam em duas faixas distintas, ou pela conservação de uma estética tradicional ou por sua subversão (STEVENS, 2003). Em ambos os casos, a relação entre arquitetos e engenheiros pressupõe a consagração do arquiteto, em que, na conservação dos valores estéticos vigentes, o engenheiro deve interferir o mínimo possível na forma arquitetônica por meio de uma ação colaborativa; e, na consagração de arquitetos pela subversão, os engenheiros devem desenvolver relações cooperativas no sentido de contribuírem para propiciar a execução da “nova estética” proposta pelo arquiteto.

³⁸ Bourdieu (1980) conceitua *habitus* como um “sistema de disposições” de nossas práticas socialmente estruturadas, sendo um esquema de práticas e ideologias característico de um grupo de agentes. No contexto de sua reflexão crítica sobre o papel da escola na reprodução social, Bourdieu atribui à escola papel destacado como dispositivo a serviço da manutenção e legitimação de privilégios sociais. Stevens (2003) faz essa reflexão aplicada ao campo da arquitetura acerca dos fundamentos sociais de distinção dos indivíduos ainda no ensino, e considera o *habitus* refinado dos indivíduos enquanto um guia para as práticas de projeção.

O setor secundário de atuação, prática associada à produção dos arquitetos subordinados, está inserido em um ambiente intermediário, entre o mundo simbólico do setor principal da arquitetura e o mundo quase inteiramente econômico do setor da engenharia. Nesta atuação do arquiteto, principalmente voltada para a produção de massa, e fortemente impactada pelas demandas de mercado, a autonomia dada pela posse de capital simbólico é fraca, estando mais suscetível às interferências das relações com outros agentes do campo da construção. Para Stevens (2003, p. 120), a autonomia é fundamental para a produção de bens arquitetônicos simbólicos, e isso faz com que as relações com outros profissionais representem um risco, uma vez que “qualquer aliança de arquitetos com quem não pertence ao campo arquitetônico necessariamente ameaça sua autonomia e a autonomia estética do projeto”.

Na luta por autonomia³⁹, em uma atuação pouco autônoma exercida pelos arquitetos subordinados, a relação entre arquitetos e engenheiros se torna evidentemente mais conflituosa. Nessa relação em que os indivíduos não tem capital simbólico suficiente para estabelecer uma hierarquia interna, a percepção do arquiteto enquanto sujeito detentor do “gosto estético requintado”⁴⁰, torna-se um argumento extremamente frágil diante do engenheiro, que se ampara em parâmetros objetivos de rentabilidade e lucro, sendo esse um critério fundamental para a produção da arquitetura ordinária. No entanto, de acordo com Stevens (2003), a formação dos arquitetos, perpetua, difunde e valoriza a formação de arquitetos eminentes, preservando por meio das práticas de ateliê a manutenção do *habitus* da elite do grupo social dos arquitetos.

Dessa maneira, no que tange às relações de troca com os engenheiros, o ensino de

³⁹ A autonomia dos arquitetos eminentes está limitada à produção de bens simbólicos inusitados e inovadores, porém a criatividade é regrada pela produção, sendo, portanto, uma atuação heterônoma com relação ao setor da construção civil. Os arquitetos subordinados, por estarem abaixo dos eminentes, têm essa autonomia criativa ainda mais restrita, o que os impele e os distancia cada vez mais da condição de se tornarem arquitetos eminentes. No entanto, todos os agentes envolvidos, ou seja, arquitetos e engenheiros eminentes ou subordinados estão submetidos aos interesses do capital, tendo seus códigos socio técnicos subordinados aos interesses políticos e econômicos.

⁴⁰ Entende-se gosto como um produto do *habitus*. Para Stevens (2003), atribuir uma naturalidade ao gosto implica não poder contestar o “bom gosto” daqueles que o tem, acreditando-se que ele surgiu naturalmente e não de um *habitus* trazido de uma posição de classe de elite. Dessa forma, os praticantes da arquitetura que não possuem o *habitus* da elite assim como os arquitetos eminentes, não terão o seu gosto reconhecido enquanto ferramenta de poder.

arquitetura atua principalmente na estruturação de relações de colaboração⁴¹ pressupondo relações assimétricas de poder. Sendo assim, veremos na próxima seção como os mecanismos de produção e reprodução do campo da arquitetura refletem na construção social das relações entre arquitetos e engenheiros, buscando compreender as diferenças nas relações construídas por arquitetos eminentes e arquitetos subordinados, e, em seguida, como as ferramentas digitais podem interferir positivamente na reconstrução dessas relações, tendo como horizonte o desenvolvimento de relações dialéticas cooperativas⁴² de conversa.

⁴¹ Colaborar significa concorrer ou contribuir, trabalhando com uma ou mais pessoas, primeiro com um objetivo individual e depois com a coletividade, podendo ou não os participantes ter conhecimento sobre o todo. Dessa forma, as relações colaborativas entre arquitetos e engenheiros não trazem a recuperação da unidade do objeto da construção, uma vez que estes agentes não se engajam em um objetivo comum. Para isso, a ação de colaborar deve ser substituída pela ação de cooperar, que significa operar de maneira conjunta, atuar juntamente com outros para um mesmo fim, contribuindo com trabalho e esforços, em que o resultado do todo prevalece sobre o individual.

⁴² Para Piaget (1973), a colaboração é anterior à cooperação em trocas sociais, sendo a cooperação uma interação que requer a formação de vínculos e de reciprocidade afetiva entre os sujeitos, possibilitando a modificação em suas estruturas cognitivas e do grupo como um todo, podendo ser dialógicas ou dialéticas, dependendo da estrutura social de atuação. De acordo com Piaget (2003), o conhecimento origina-se e desenvolve-se da interação entre sujeitos e objetos. Desse modo, a apropriação de conhecimento consiste em uma construção do objeto explorado através de experimentações, bem como de transmissões sociais, educativas, linguísticas, a partir das quais o objeto é inserido em um sistema de relações mediante operações concretas, lógicas, simbólicas.

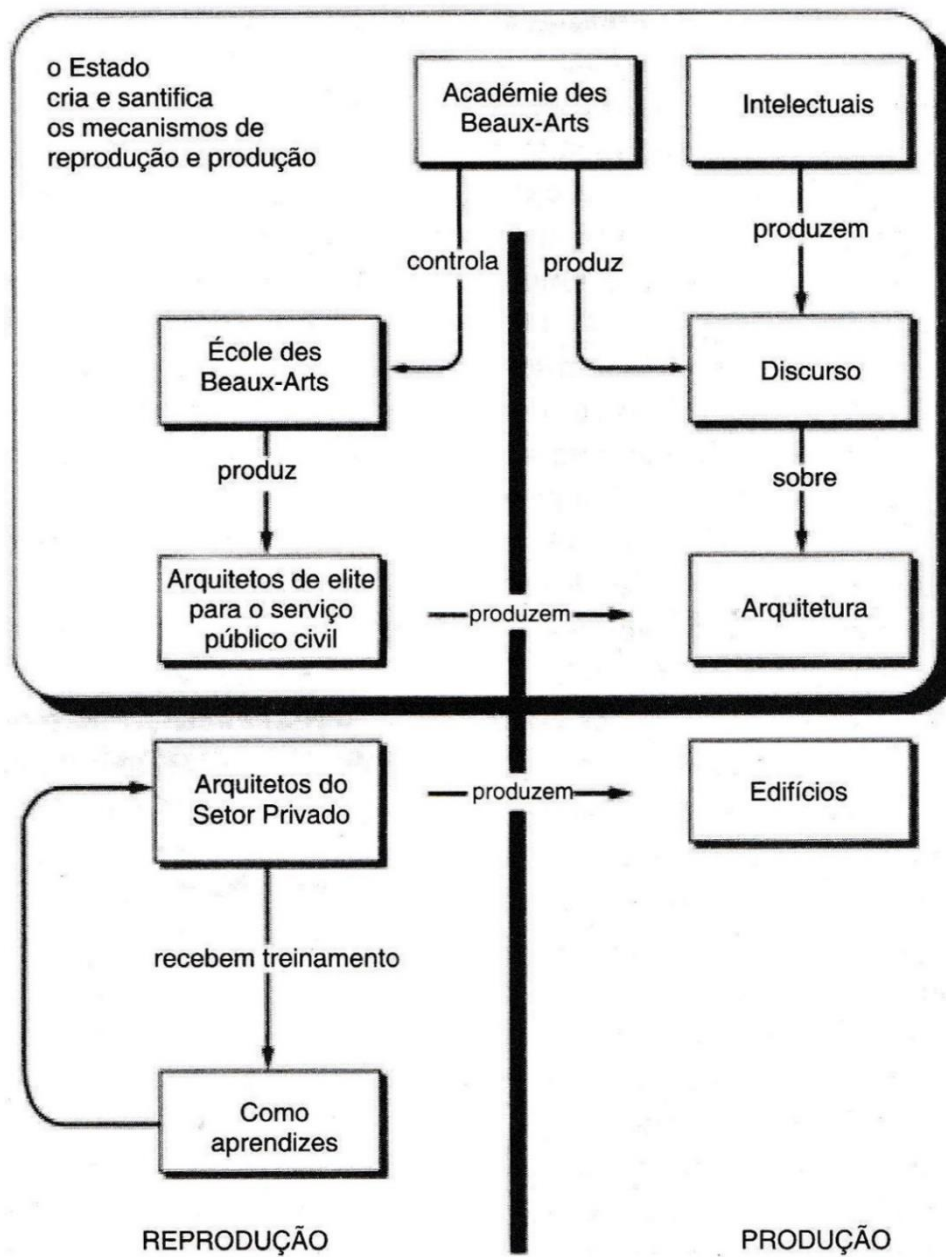


FIGURA 03 - Mecanismos de produção e reprodução do método *Beaux-Arts*.
 Fonte: STEVENS, 2003.

2.1.1 Construção social das relações entre arquitetos e engenheiros

A preservação dos modos de produção e reprodução nos campos da arquitetura e da engenharia não sofreu grandes modificações ao longo do séc. XX, perpetuando os mesmos mecanismos instituídos no séc. XIX. A formação de arquitetos e engenheiros os expõem à diferentes perspectivas de atuação, sendo esse percurso determinante para o desenvolvimento de relações de colaboração ou cooperação. Enquanto a arquitetura se consolidou enquanto campo em uma perspectiva elitista orientada pelo código estético, a profissão da engenharia se consolidou dentro do princípio da racionalidade técnica fundamentada na ascensão de ideologias científicas e positivistas, que consistiam em solucionar problemas instrumentais selecionando meios que melhor se ajustam às questões relativas à função, ao material e à economia⁴³.

Como forma de suprir a fragmentação do trabalho pós-Revolução Industrial, arquitetos e engenheiros desenvolveram mecanismos de colaboração decorrentes da interface entre arquitetura e estrutura, articulando formas colaborativas de atuação. As relações de colaboração utilizam formas clássicas disciplinares de trabalho, em que cada disciplina mantém um baixo grau de permeabilidade nos seus processos de projeto. A divisão do trabalho estabelece que o arquiteto é o sujeito “criativo” que modela o ambiente construído com enfoque estético enquanto o engenheiro tem uma abordagem técnica focada na eficiência. De acordo com o filósofo Christoph Baumberger⁴⁴ (2012), o formato das relações está intrinsecamente relacionado não só com os processos, mas também com os produtos arquitetônicos e seus valores éticos e estéticos.

O modo predominante em que essas relações entre arquitetos e engenheiros ocorre na prática de projeção pode ser caracterizado como relações de monólogo, que conforme

⁴³ No entanto, para Pogacnik (2012), se a cultura visual dos engenheiros do século XIX não tivesse sido tão profundamente enraizada em uma educação clássica e histórica, o reconhecimento histórico de suas conquistas seria impensável.

⁴⁴ Christoph Baumberger está a frente do grupo de pesquisa ambiente sobre Filosofia do Meio Ambiente da ETH Zurich, do Instituto de Decisões do Meio da mesma instituição. Obteve seu doutorado em filosofia pela Universidade de Zurich em 2009. Foi pesquisador do programa de Ética da Universidade de Zurich entre 2009 a 2013. Foi professor convidado da Escola de Ciências Econômicas e Políticas de Londres em 2017 e na Universidade Livre de Amsterdam em 2016. É professor da Universidade de Basel desde 2014. Uma das áreas de pesquisa é na filosofia da arquitetura.

Baumberger (2012) se refere à redução disciplinar entre a distinção do engenheiro enquanto um técnico focado na construção, e o arquiteto enquanto um artista, focado no projeto. O monólogo do arquiteto se trata de processos em que esse tem autonomia para realizar o gesto artístico, cabendo ao engenheiro colaborar com a validação e construção da forma, mesmo que leve a soluções que impactem negativamente a qualidade e o custo estrutural. Já o monólogo do engenheiro, refere-se aos processos em que ele despreza as soluções arquitetônicas em função do desenvolvimento de projeto estrutural orientado para critérios racionais e econômicos. Tais relações estão intrinsecamente relacionadas com a assimetria na posse de capitais simbólicos, em que geralmente o arquiteto se vale da posse de capital social e capital cultural corporificado como instrumento de autoridade. Para Stevens (2003), o poder simbólico representa a cultura, em que são travadas as batalhas simbólicas da sociedade. Nesse processo, a cultura tem como função legitimar o dominante, reforçando e inviabilizando a situação desfavorável do dominado. Essa abordagem em que o arquiteto, detentor do poder simbólico, associa-se ao engenheiro em uma relação de colaboração baseada em uma “relação de respeito”⁴⁵ ao projeto arquitetônico, tornou-se o discurso dominante para o campo ao longo do séc. XX.

O discurso produzido no âmbito da Arquitetura Moderna buscou conciliar os parâmetros arquitetônicos com a abordagem dos engenheiros, buscando incorporar os avanços técnicos da engenharia e da lógica fordista de produção a uma estética de racionalidade construtiva. Le Corbusier chegou a afirmar que o processo da engenharia deveria conduzir o desenvolvimento da arquitetura, ressaltando que os engenheiros também fazem arquitetura por meio de cálculos⁴⁶ (KARA, 2016). Em seu projeto manifesto *Maison Dom-ino* (FIG. 04), Le

⁴⁵ Esta referência se trata da pesquisa realizada por *Silva et al.* (2017), apresentada no III Eneeea (Encontro Nacional de Ensino de Estruturas em Escolas de Arquitetura) cujo objetivo foi investigar em que medida o treinamento recebido no ensino de estruturas na engenharia reflete a prática profissional dos engenheiros. Nas entrevistas realizadas, a palavra “respeito” foi usada por todos os entrevistados para caracterizar as interações entre engenheiros e arquitetos ou entre projeto estrutural e projeto arquitetônico. Para *Silva et al.* (2017) a palavra “respeito” pareceu significar uma divisão clara de incumbências, sem riscos de invasão de território alheio. Porém, embora tenha sido declarado o respeito ao projeto arquitetônico, os entrevistados alegaram que as estruturas propostas pelos arquitetos seriam, em sua grande maioria, equivocadas e incoerentes, sem correspondência entre planos sobrepostos e com quantidade de elementos estruturais exagerada ou subestimada. No entanto, os engenheiros entrevistados consideraram que a realização de reuniões com arquitetos para discussões sobre concepções estruturais tende a ser visto como perda de tempo.

⁴⁶ No original: “Engineers make architecture, since they use calculations that issue from the laws of nature, and their works make us feel harmony. So, there is an aesthetic of the engineer, because when doing calculations, it is necessary to qualify certain terms of the equation, and what intervenes is taste. Now when one does calculations,

Corbusier⁴⁷, alegava racionalidade na separação estrutura-forma e forma-espço em que a estrutura se torna um objeto independente da arquitetura como uma forma criar espaços livres, possibilitando uma liberdade de apropriação. A intenção neste tipo de proposta era produzir uma arquitetura que tentava mediar os aspectos estéticos, programáticos e técnicos. No entanto, na abordagem moderna, os aspectos estéticos e programáticos eram prioritários, devendo ser plenamente solucionados, sendo a estrutura um componente que vem muitas vezes *a posteriori* da síntese projetual. No entanto, em “*Vers une Architecture*”, Corbusier (1925) reforça a separação entre projeto e construção, ressaltando que “depois de tantos silos, fábricas, máquinas e arranha-céus”⁴⁸ cabe ressaltar que a arquitetura (em letras maiúsculas conforme a publicação original) é um fato de arte, um fenômeno da emoção, fora das questões da construção, que tem como função somente a realização do objeto arquitetônico. Embora algumas manifestações ao longo do séc. XX, assim como o movimento *High Tech* surgido na década de 1970, tenha colocado os aspectos técnicos, incluindo a estrutura em evidência, essa exploração da estética estrutural ocorreu na ordem do simbólico, relacionada a uma ideia de progresso e avanço tecnológico em que a eficiência estrutural aparente era quase uma exploração alegórica e não uma consideração tectônica da prática de projeção, o que somente reforçava a visão moderna de Corbusier para a prática de projeção.

one is in a pure state of mind and, in that state of mind, taste follows reliable paths.” (CORBUSIER, 2008 *apud* KARA, 2016)

⁴⁷ A publicação *Vers une Architecture* trata do papel dos arquitetos e dos engenheiros, em que no capítulo “*Esthétique de l'Ingénieur Architecture*”, Corbusier apresenta a seguinte reflexão: “Estética do engenheiro, arquitetura, duas coisas em solidariedade, consecutivas, uma em plena floração, a outra em dolorosa regressão. O engenheiro, inspirado pela lei da economia e impulsionado pelo cálculo, nos coloca em acordo com as leis do universo. Ele alcança a harmonia. O arquiteto, pela ordem das formas, realiza uma ordem que é pura criação de sua mente; pelas formas, afeta intensamente nossos sentidos, causando emoções plásticas; pelos relatos que ele cria, ele desperta em nós ressonâncias profundas, ele nos dá a medida de uma ordem que sentimos de acordo com a do mundo, ele determina vários movimentos da nossa mente e do nosso coração. É quando sentimos a beleza. (tradução nossa). No original: “*Esthétique de l'ingénieur, architecture, deux choses solidaires, consécutives, l'une en pleine floraison, l'autre en régression douloureuse. L'ingénieur, inspiré par la loi d'économie et conduit par le calcul, nous met en accord avec les lois de l'univers. Il atteint l'harmonie. L'architect, par l'ordonnance des formes, réalise un ordre qui est une pure création de son esprit; par les formes, il affect intensivement nos sens, provoquant des émotions plastiques; par les rapports qu'il crée, il éveille en nous des résonances profondes, il nous donne la mesure d'un ordre qu'on sent en accord avec celui du monde, il détermine des mouvements divers de notre esprit et de notre cœur: c'est alors que nous ressentons la beauté.*” (LE CORBUSIER, 1925, p.4)

⁴⁸ Tradução nossa. No original: “*Il nous sera enfin agréable de parler architecture après tant de silos, d'usines, de machines et de gratte-ciel. L'architecture est un fait d'art, un phénomène d'émotion, en dehors des questions de construction, au delà. La construction, c'est pour faire tenir; l'architecture, c'est pour émouvoir*” (LE CORBUSIER, 1925, p. 9)

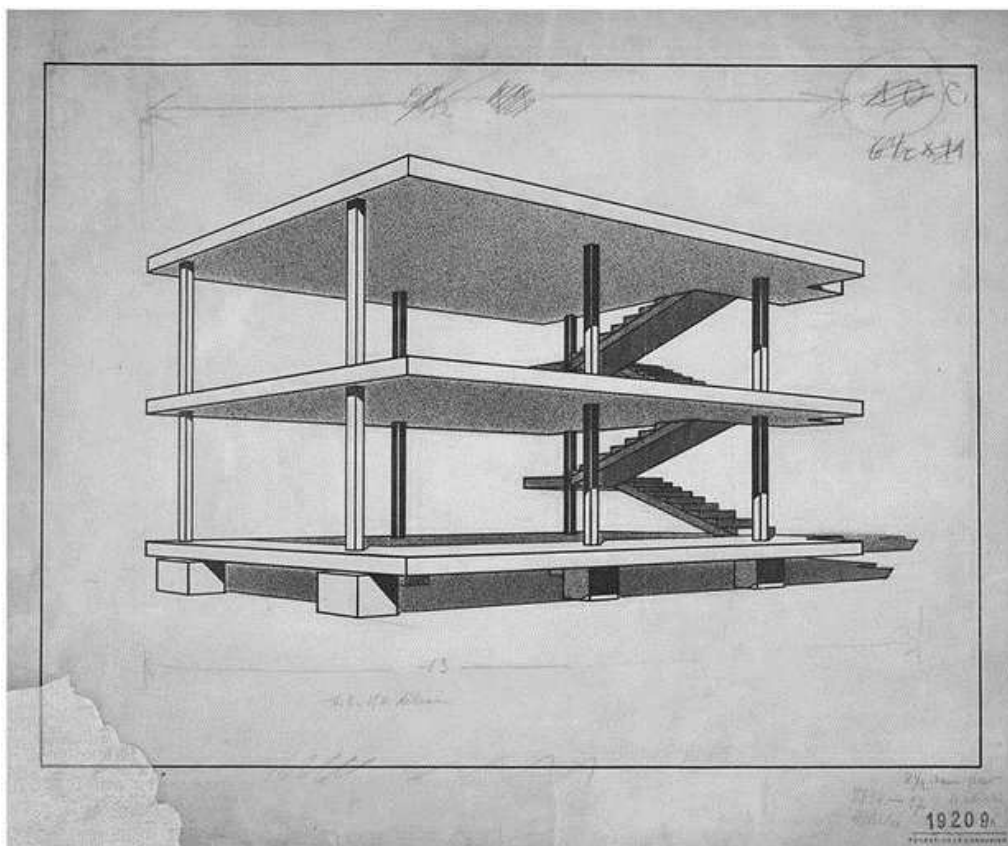


FIGURA 04 - *Maison Dom-ino*, Le Corbusier, 1915.

Fonte: LE CORBUSIER, 1925.

As práticas de solilóquio⁴⁹ existentes no séc. XX, que ocorrem quando o arquiteto e o engenheiro se personificam em uma única pessoa, constituíram de acordo com Baumberger (2012) como práticas alternativas, e não fizeram parte da narrativa principal do campo da arquitetura. Podemos citar como praticantes desta relação os arquitetos-engenheiros Pier Luigi Nervi⁵⁰ (FIG. 05), Félix Candela⁵¹, Eduardo Torroja⁵² e Frei Otto⁵³. Nesse processo, o projeto arquitetônico é desenvolvido a partir de princípios estruturais e construtivos, e a estrutura busca alcançar aspectos simbólicos e estéticos. Na maioria das obras desses

⁴⁹ Solilóquio é o ato de alguém conversar consigo próprio.

⁵⁰ Pier Luigi Nervi (1891-1979) obteve a titulação de engenheiro construtor pela Universidade de Bolonha (1913), mas que à época na Itália, também poderia ser considerado arquiteto.

⁵¹ Félix Candela (1910-1997) formou-se arquiteto pela Escola Superior de Madri (1935), e após imigrar para o México passa a atuar como engenheiro de estruturas desenvolvendo trabalhos experimentais com cascas finas em concreto reforçado.

⁵² Eduardo Torroja (1899-1961) graduou-se em engenharia civil pela Escola de Engenharia Civil de Madrid (1917) e também desenvolveu trabalhos explorando o potencial do concreto reforçado.

⁵³ Frei Otto (1915-2015) graduou-se arquiteto pela Universidade Técnica de Berlim, onde também concluiu o doutorado em engenharia civil em 1954. Frei Otto ficou conhecido pelo seu trabalho com estruturas leves e estruturas em membrana. Fundou o *Institute for Lightweight Structures* na Universidade de Stuttgart, onde conduziu pesquisa em que foi desenvolvida uma série de métodos de *form-finding* por meio de modelos físicos para a determinação da forma ótima e avaliação do seu comportamento.

arquitetos-engenheiros, o que se nota é o ato de construir servindo como uma orientação de projeto. Porém, são os conceitos formais que guiam o desenvolvimento da estrutura, tendendo a ter uma expressividade exagerada do comportamento estrutural, potencializando o uso das ciências estáticas para alcançar uma melhor *performance* na relação entre o mínimo uso de material e a maximização dos vãos levada a um grau ornamental. Para Baumberger (2012), a estética desenvolvida pelos arquitetos-engenheiros tende a dissolver a massa estrutural, gerando produtos arquitetônicos em que a estrutura é a própria arquitetura. Nesse processo, as decisões que afetam a forma são feitas por razões técnicas do sistema estrutural adotado e não têm a intenção de mascarar os efeitos visuais decorrentes. A articulação espacial não é um fator determinante; geralmente se trata de projetos para cobrir grandes vãos em que existe uma intenção de otimizar a relação entre as ações incidentes e o peso próprio da estrutura. A estrutura funciona neste sentido como um exoesqueleto com o objetivo de potencializar a articulação do espaço.



FIGURA 05 - Palazzetto dello Sport, Pier Luigi Nervi, 1958.
Fonte: BAUMBERGER, 2012.

A figura do arquiteto-engenheiro personificada na relação de solilóquio geralmente é marginalizada pelo campo da arquitetura. Num mundo de especialização profissional crescente em que ocorrem disputas sociais entre os profissionais devido às relações de poder pressupostas, a figura do profissional generalista causa um certo desconforto em ambos os lados, que exigem um posicionamento disciplinar deste profissional. Desta maneira, tanto o

ensino de arquitetura e quanto o ensino de engenharia promovem e estimulam as relações de monólogo. E, uma vez que a construção dessas relações de monólogo são construções sociais, estas são intrinsecamente dependentes da posse de capitais simbólicos entre cada um dos participantes.

Para Fai Au⁵⁴ (2012, p.237), enquanto os engenheiros são treinados para serem especialistas, os arquitetos “são treinados para se comportarem como grandes arquitetos, e para isso é necessário que se sintam livres para se comportarem como tal”. Isto significa que o treinamento dado aos arquitetos estimula a produção profissional autônoma, cuja autonomia criativa na composição do objeto é garantida aos arquitetos eminentes por sua alta posse de capital simbólico. Dessa maneira, quando um arquiteto eminente encontra um engenheiro subordinado, esse procura não contradizer o pedido do arquiteto, mesmo que isso signifique desenvolver soluções estruturais injustificáveis. Da mesma forma, quando o engenheiro eminente encontra o arquiteto subordinado, ele autoritariamente se nega a considerar suas soluções arquitetônicas propostas, desenvolvendo projetos estruturais que podem transfigurar as intenções de forma e espacialidade. No entanto, Au (2012) menciona que na maioria dos casos o que ocorre é um encontro de profissionais “médios”, em que nenhum dos dois possui relações de autoridade um sobre o outro. Nessas relações, responsáveis pela maior parte da produção de arquitetura ordinária, são onde o conflito tende a ocorrer com maior intensidade.

Sendo assim, podemos considerar que as relações entre arquitetos e engenheiros também estão intrinsecamente relacionadas ao mecanismo de produção e reprodução do campo da arquitetura, estando determinados pela posição social de cada um dos participantes e como irão desenvolver relações de autoridade na prática de projeção. Essa autoridade determina a simetria ou assimetria das relações entre arquitetos e engenheiros. Dessa maneira, utilizando a abordagem baseada na posse de capitais proposta por Bourdieu (1980), percebemos que a estrutura das relações está diretamente relacionada à posse de capitais simbólicos, que se constitui de capital social e cultural.

⁵⁴ Arquiteto, fundador do *O Studio Architects*, obteve sua graduação no Real Instituto de Tecnologia de Melbourne e mestrado em Harvard. É atualmente professor assistente do Departamento de Arquitetura da Universidade de Hong Kong.

Considerando a posse de capitais simbólicos enquanto instrumento para o estabelecimento de autoridade na prática de projeção arquitetônica, podemos considerar que as relações desenvolvidas entre arquitetos e engenheiros não são homogêneas e, sendo construções sociais, estão intrinsecamente relacionadas às posses de capitais dos participantes. Dessa maneira, podemos identificar, por meio da variação da quantidade de capital simbólico entre arquitetos e engenheiros, uma série de relações, podendo ser assimétricas ou simétricas, conforme descritas abaixo:

- a) *Arquiteto eminente – Engenheiro eminente*: relação em que ambos possuem alto valor de capital simbólico, tendo o arquiteto um maior valor de capital cultural ou social. Podem se desenvolver relações de colaboração ou cooperação em que a contribuição do engenheiro se inicia já na concepção. Essas relações tendem a não serem conflituosas, já que o engenheiro auxilia o arquiteto a materializar seus conceitos formais e espaciais, desenvolvendo uma relação de “respeito” ao projeto arquitetônico. O desempenho técnico e os princípios econômicos não são as únicas preocupações do engenheiro ao desenvolver o projeto estrutural, já que esse também demonstra um comprometimento com as questões estéticas e espaciais. Essas relações geralmente são desenvolvidas para obras de alto valor simbólico;
- b) *Arquiteto eminente – Engenheiro subordinado*: relação de colaboração em que o arquiteto possui alto valor de capital simbólico, e estabelece uma relação de autoridade sobre o engenheiro, que por não possuir capital simbólico, não contradiz o arquiteto e tem que solucionar o problema estrutural posto pelo projeto, mesmo que esse leve a soluções técnicas injustificáveis;
- c) *Engenheiro eminente – Arquiteto subordinado*: relação em que o engenheiro possui maior capital social do que o arquiteto, e não reconhece o capital cultural do arquiteto no estado institucionalizado e objetivado como uma autoridade. Para Penzel⁵⁵ (2012), nesta relação “o engenheiro se comporta como um arquiteto” de tal maneira a

⁵⁵ Christian Penzel é arquiteto formado em desenho industrial e arquitetura nas universidades de Hamburgo e Berlim. Foi chefe assistente do departamento de arquitetura e tecnologia da ETH Zurich. Em 2004, fundou junto com o engenheiro de estruturas Martin Valier, o escritório de arquitetura e engenharia *Penzel Valier* em Zurich.

persuadir os parâmetros arquitetônicos em detrimento do projeto estrutural e da economia;

- d) *Arquiteto subordinado – Engenheiro subordinado*: ambos possuem somente capital cultural institucionalizado, tendo o arquiteto uma predisposição a aquisição de capital cultural objetivado. O engenheiro não reconhece uma maior aquisição de capital cultural do arquiteto como um valor suficiente para este estabelecer uma relação de autoridade.

2.2 A conversa emergente

A tecnologia digital tem transformado tanto a prática de projeção na arquitetura quanto na engenharia, potencializando a interação e evidenciando a complexidade e a não linearidade do processo de projeto por meio da expansão das possibilidades de representação, visualização e simulação. As ferramentas digitais propiciam um ambiente de projeto em que é possível explicitar os parâmetros para o desenvolvimento de processos circulares de análise e síntese, promovendo o que Lawson (1997, p. 287, tradução nossa) vislumbrava como uma função ambiciosa em que “o computador pegaria todos os dados que pudéssemos fornecer e geraria uma ou mais soluções de projeto”.

Para Lawson (1997)⁵⁶, o futuro da projeção pode ser conservativo, em ordem de manter as estruturas vigentes, ou não conservativo, em que as mudanças estruturais na sociedade resultariam no fim do profissionalismo como conhecemos, abrindo o processo para abordagens participativas e sugerindo percursos alternativos de ação. O que nos interessa nesta tese é compreender os princípios conservativos das práticas digitais e buscar indícios para desenvolver procedimentos que propiciem a construção de processos de projeção não conservativos com relação à interação entre arquitetos e engenheiros utilizando essas práticas como meios facilitadores de conversação. Para tanto, consideramos importante

⁵⁶ Embora Lawson (1997) tenha elaborado esta abordagem tendo como horizonte a participação do usuário, acreditamos que a abordagem participativa de projeto também pode se estender à participação do engenheiro, já que esse também pode contribuir com o processo de projeto com “habilidades especializadas de tomada de decisão” (LAWSON, 1997, p. 28). Desta maneira, compreendemos que o projetista a qual Lawson se refere não se restringe à personificação na figura do arquiteto, mas pode se estender a uma equipe interdisciplinar de projetistas.

compreender a atuação conservativa na projeção digital, de tal maneira a evitar práticas que mantenham e acentuem a divisão do trabalho em processos de monólogo. Assim, além de analisar o uso das ferramentas digitais na prática de projeção conservativa no que tange à relação entre arquitetura e estrutura, buscaremos compreender como as ferramentas digitais podem se constituir como instrumentos que propiciam a construção de relações dialógicas e dialéticas entre arquitetos e engenheiros na prática de projeção.

Essas relações facilitadas pelas ferramentas digitais apresentam possibilidades de construção de práticas cooperativas por meio da exploração e transposição de conceitos, tais como modelo paramétrico e *performance* para a prática computacional para além de procedimentos ancorados por um raciocínio cientificista. Dessa maneira, buscaremos realizar uma reflexão acerca destes conceitos para além da instrumentalização digital, procurando as oportunidades que eles oferecem para a constituição de relações de conversa e sua orientação para o desenvolvimento de práticas de projeção tectônicas.

2.2.1 Procedimentos conservativos

Os procedimentos conservativos⁵⁷ utilizando processos digitais mantêm os mecanismos de produção e reprodução do campo da arquitetura, assim como sustentam as relações de monólogo entre arquitetos e engenheiros. Nesse sentido, a tecnologia digital vem acentuando a especialização de cada disciplina, estando os engenheiros cada vez mais envolvidos com análises matemáticas complexas, e os arquitetos cada vez mais especializados em *softwares* de representação e produção de imagens, o que corrobora a hipótese de uma fragmentação e um distanciamento cada vez maior entre atores na prática de projeção.

No final do séc. XX e início deste século, as possibilidades digitais de projeção fizeram com que os arquitetos explorassem formas visualmente complexas, criadas sem consideração estrutural. Essa possibilidade de projeção de formas de complexidade escultórica, antes impossíveis de serem projetadas por um sistema de representação notacional⁵⁸, trouxe uma

⁵⁷ A criação dos termos “procedimentos conservativos” e “procedimentos não conservativos” feita neste trabalho têm como referência à definição realizada por Lawson (1997) para o futuro das práticas de projeção, mencionadas anteriormente.

⁵⁸ A representação notacional significou o uso do desenho de representação baseado em geometria euclidiana

percepção esquizofrênica do projeto estrutural, em que foram criados projetos com múltiplos sistemas estruturais para suportar a forma pretendida, sem qualquer preocupação com a eficiência na quantidade de material estrutural empregado, trazendo sérias implicações de construtibilidade e custo. Nessa abordagem a estrutura é ignorada enquanto um elemento arquitetônico, não interferindo na experiência do espaço nem na experiência estética. Nesses projetos, a forma exterior não dá indícios da estrutura, tendo uma dicotomia entre sua aparência e suas implicações construtivas, assim como podemos ver nas obras de Zaha Hadid, em que, na maior parte dos casos, o envelope não tem nenhuma relação com o suporte (FIG. 06).

Esses processos de projeção e as oportunidades econômicas da primeira década dos anos 2000, potencializaram a figura do “arquiteto celebridade”⁵⁹ e conseqüentemente a ênfase nas relações de monólogo, tendo sido construídas grandes narrativas para ancorar seu *status*. Patrick Schumacher⁶⁰ (2008) publicou um manifesto em defesa do “parametricismo”, que, segundo ele, trata-se de um novo estilo e não apenas de um “novo conjunto de técnicas”. Este novo estilo, que substituiria o Modernismo, estaria calcado esteticamente em uma “elegância da complexidade ordenada e na sensação de fluidez perfeita”.

como uma mediação entre a ideia do arquiteto e a sua execução no canteiro.

⁵⁹ Do termo “*Star Architect*” ou “*Starchitect*”.

⁶⁰ Patrick Schumacher é formado em arquitetura pela Universidade de Stuttgart e obteve seu doutorado no Instituto de Ciência Cultural da Universidade de Klagenfurt. Lecionou em diversas instituições na Inglaterra, Europa e Estados Unidos. É atualmente diretor e projetista sênior do *Zaha Hadid Architects*.

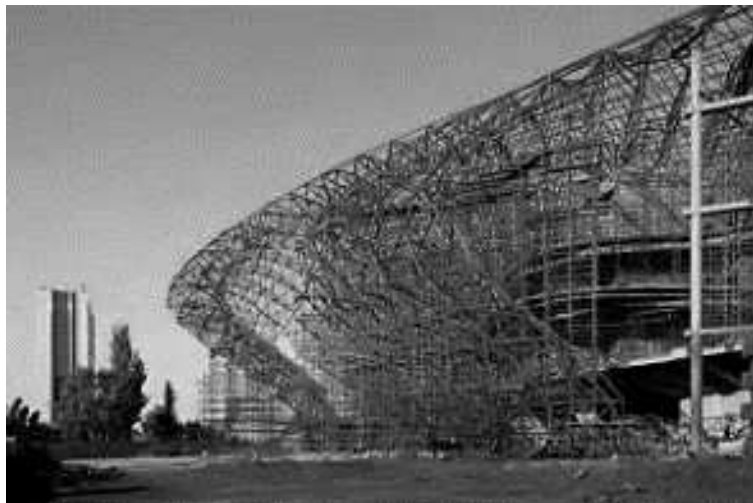
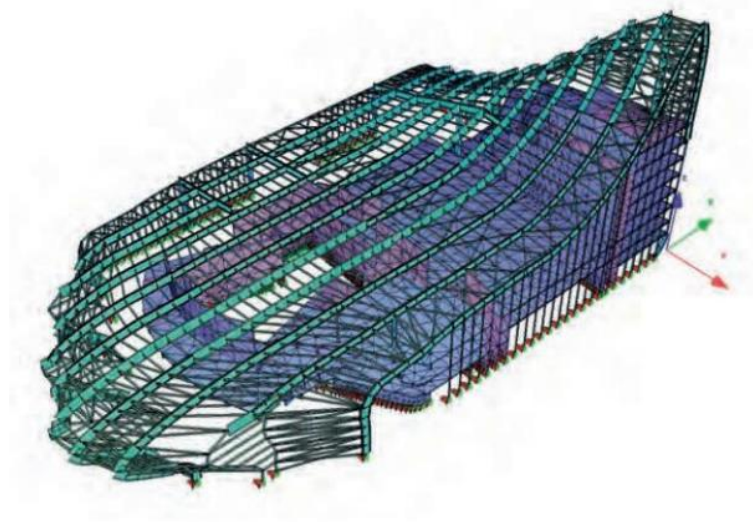


FIGURA 06 - Heydar Aliyev Center de Zaha Hadid: projeto, construção da estrutura e obra acabada.
Fonte: KARA, 2016.

No entanto, a crítica aos projetos formalistas destituídos de significado, apontou para a necessidade de explorar a complexidade estrutural de maneira expressiva e visualmente perceptível. Um dos primeiros projetos a explorar a estrutura como ornamento foi o Estádio Nacional de Pequim (2003-2008) da dupla suíça Jacques Herzog e Pierre de Meuron. Entretanto, ainda que tenha havido uma preocupação em relacionar o envelope ao suporte, o processo foi orientado para a estética em detrimento das considerações técnicas, produzindo uma imagem estrutural carregada de dramaticidade, com tratamento escultural e uso exagerado da escala. A *performance* do material foi uma consideração secundária à imagem produzida, tendo a tipologia estrutural sido manipulada para aparentar eficiência. Para Picon⁶¹ (2010), este tipo de arquitetura em que a ornamentação estrutural consistiu em produzir uma estética alegórica representou “um novo tipo de antigravidade na era da supercola” (FIG. 07).

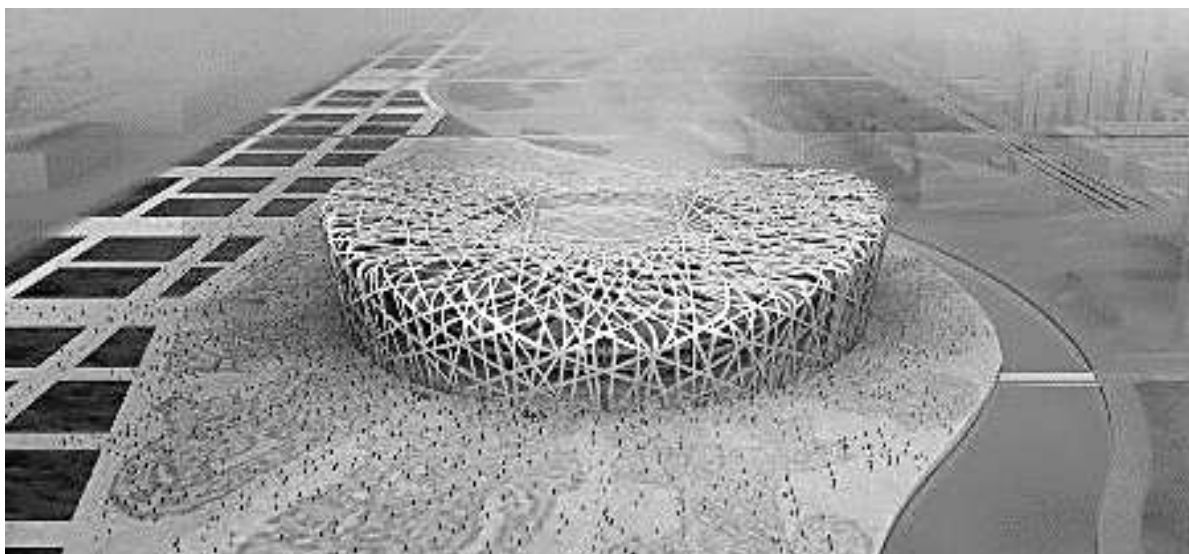


FIGURA 07 - Projeto para o Estádio Nacional de Pequim, Herzog & de Meuron, 2003-2008.
Fonte: PICON, 2012.

Nessas experiências, a diferenciação entre envelope e suporte se tornou menos evidente, sendo difícil distinguir o que era de fato elemento estrutural, do que eram os elementos ornamentais, que simulavam uma condição estrutural. No entanto, as imagens dos diagramas de análise estrutural construídos em ferramentas computacionais baseadas em Método dos

⁶¹ Antoine Picon é graduado em Engenharia, mestre em Arquitetura e doutor em História. É professor da Escola de Arquitetura de Harvard e pesquisador da *École Nationale des Ponts et Chaussées* em Paris. Em seu livro *Digital Culture in Architecture*, analisa o impacto das tecnologias e da cultura digital no trabalho do arquiteto.

Elementos Finitos⁶² (FIG. 08) passaram a compor as ilustrações dos projetos de arquitetura em livros e publicações. Essa utilização dos diagramas estruturais passou a ser explorada enquanto uma imagem de complexidade e sofisticação tecnológica de projeto e produção. Embora a estrutura nesses projetos seja mais uma alegoria do que de fato um elemento arquitetônico, esses processos aproximaram o engenheiro do arquiteto, já que, para a validação e execução de uma nova estética que incluía uma linguagem estrutural ousada, era necessária a cooperação dos engenheiros desde as etapas iniciais. O desenvolvimento de processos cooperativos para a projeção e execução de projetos que exploravam a estrutura como ornamento levou à formação de equipes interdisciplinares dentro de grandes escritórios de arquitetura e engenharia⁶³.

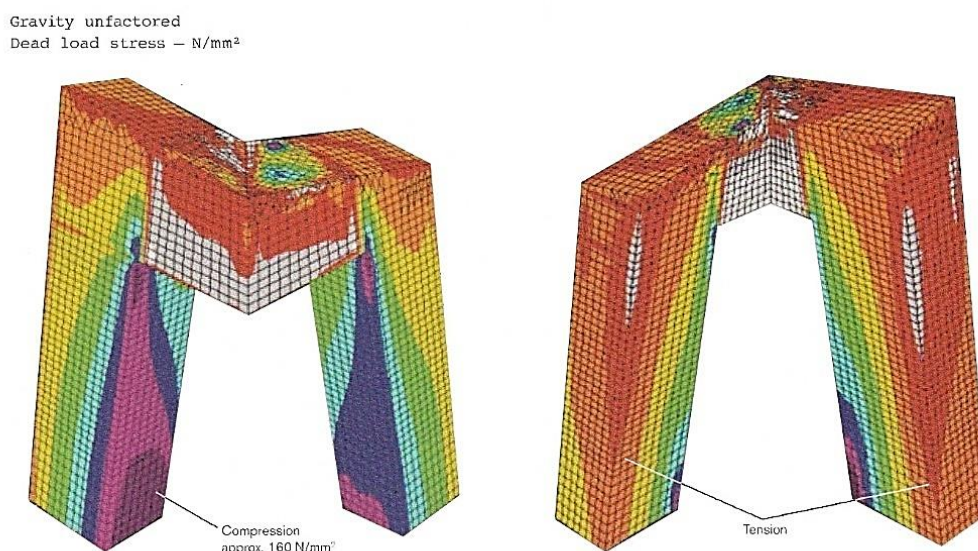


FIGURA 08 - Diagramas estruturais para projeto do edifício CCTV.
Fonte: BALMOND, 2013.

Esses processos de cooperação entre arquitetos e engenheiros se tornaram extremamente

⁶² Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método de cálculo computacional baseado na resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais. Os *softwares* permitem uma simulação do comportamento da forma através de sua discretização em uma malha de elementos, onde seu comportamento pode ser analisado nos vértices de cada um dos elementos, podendo diminuir ou aumentar o número de elementos da malha.

⁶³ Peters e Peters (2013) menciona diferentes maneiras de desenvolvimento de trabalhos colaborativos baseados em desempenho realizados por equipes interdisciplinares e mediados por ferramentas digitais paramétricas e algorítmicas. O processo de trabalho mais comum é ter um grupo interno de especialistas em computação auxiliando as equipes de projeto, por exemplo, o *Specialist Modelling Group* (SMG) do escritório de arquitetura Foster+Partners ou o *Advanced Geometry Unit at Arup* (AGU) do escritório ARUP, fundado em 2000 por Cecil Balmond. Para uma abordagem mais ampla sobre o assunto, ver a dissertação de mestrado desenvolvida pela autora em Borges (2015).

complicados⁶⁴ e intrinsecamente dependentes da capacidade do engenheiro de materializar a forma e torná-la exequível. Dessa maneira, os engenheiros eminentes, que trabalharam em cooperação com esses arquitetos, passaram a reivindicar o *status* de “engenheiro celebridade”, tornando-se menos engajados em compreender o gesto arquitetônico produzido pelo arquiteto e mais interessados na participação no processo e no engajamento criativo com a concepção, vislumbrando a possibilidade de tornar a obra um manifesto da engenharia.

Cecil Balmond⁶⁵ é uma figura importante para a reflexão acerca da emergência do “engenheiro celebridade”. Balmond é engenheiro de estruturas e trabalhou em colaboração com arquitetos “celebridades”, tais como Rem Koolhaas, Daniel Libeskind, Álvaro Siza e Arata Isozaki, dentre outros. No entanto, a contribuição de Balmond vai além da prática e das relações de cooperação; ele traz uma abordagem discursiva em uma reflexão sobre a prática de colaboração e cooperação entre arquitetos e engenheiros, conforme exposto nas publicações *Informal* (2002) e *Crossover* (2013).

Em *Informal*, Balmond (2002) fala da diluição das fronteiras disciplinares entre arquitetos e engenheiros e de uma prática emergente, ao mesmo tempo em que discursa sobre a posição

⁶⁴ Cabe-nos aqui diferenciar o pensamento complicado do pensamento complexo. A teoria do pensamento complexo sistematizada por Morin (2007) acredita que os fenômenos da realidade não são simples, mas compostos por um emaranhado de informações. O pensamento complexo é o oposto de um modelo de padronização do raciocínio moderno e mecanicista, aceitando a singularidade de cada ciclo e de cada modelo. O legado mecanicista evita o modo de operar complexo que aceita a incerteza e a transformação natural dos sistemas. Os modelos complicados são criados para tentar controlar de maneira mecanicista modelos complexos, criando assim processos confusos e de difícil entendimento. Sendo assim, para o desenvolvimento de modelos complexos é necessário que sejam criados novos caminhos e estratégias de ação que sejam não-conservativos com relação ao modo de operar mecanicista. Para sua aplicação no ensino, a teoria da complexidade assim como a transdisciplinaridade, propõem a religação dos saberes compartimentados, sugerindo a superação do modo de pensar dicotômico, estimulando um modo de pensar marcado pela articulação, considerando que, o pensamento clássico e sua fragmentação disciplinar, ao servir de instrumento para a observação da atual realidade, revelam uma defasagem conceitual para a prática educacional ao se pensar soluções para a sociedade contemporânea.

⁶⁵ Cecil Balmond é fundador do *Balmond Studio* inaugurado em 2011, e se apresenta como artista, *designer* e engenheiro e segundo ele, atua como um reiventor do conceito de espaço, transformando em sua prática o significado de geometria, forma e estrutura (BALMOND, 2013). Balmond é formado em Engenharia Civil pela Universidade de Colombo no Sri Lanka. Obteve seu doutorado na Universidade de Londres em 2009. É professor de Sistemas Não-Lineares (*Non-Linear Systems Organisation*) do departamento de Design da Universidade da Pensilvânia. Já foi professor visitante na Universidade de Arquitetura de Yale e na Universidade de Harvard. Foi presidente da divisão europeia do escritório de Engenharia Arup, onde também fundou o grupo AGU (*Advanced Geometry Unit*). Balmond recebeu uma série de prêmios relacionados à área de arquitetura por sua atuação e por suas publicações.

paradoxal do engenheiro, considerando que esse deve ter a habilidade de inovar, mas ao mesmo tempo deve suprimir suas impressões em detrimento dos parâmetros arquitetônicos. No entanto, Balmond cria apontamentos discursivos sobre as características do seu trabalho, fundamentando-o por meio do conceito “informal”, que significa desenvolver soluções estruturais específicas para o local, tratando o equilíbrio como um conceito híbrido, que pode resultar em padrões estruturais estéticos e construtivos justapostos (FIG. 09). Já na publicação *Crossover* (2013), Balmond procura desmistificar o antagonismo do engenheiro como sendo um sujeito puramente racional e não criativo que atua na contramão da arte e da arquitetura. Ele propõe uma abordagem em que arte e ciência se sobreponham, já que, em sua concepção, o projeto não deve se fixar em nenhum dos campos, mas ser conduzido pelas suas singularidades e oportunidades.

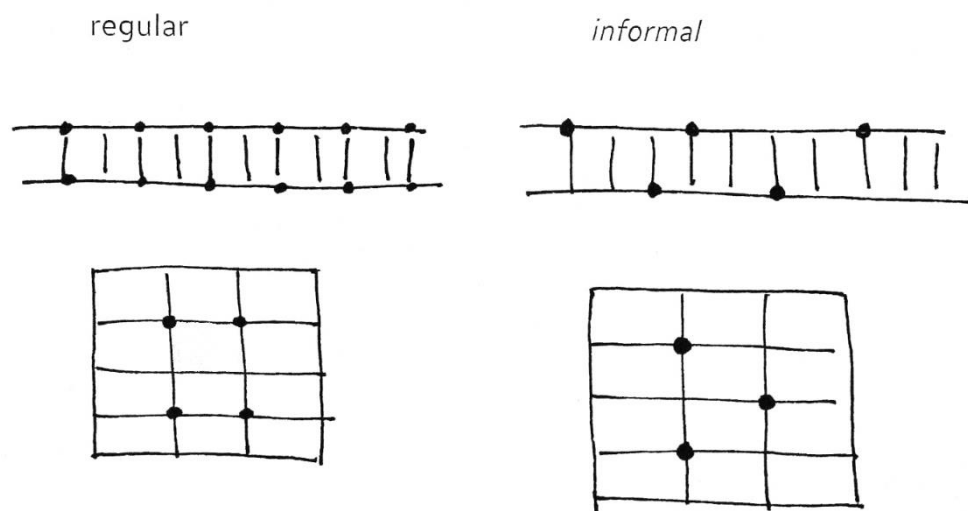


FIGURA 09 - Proposta conceitual para uma estética estrutural “informal”.
Fonte: BALMOND, 2002.

Em ambas as publicações, Balmond (2002; 2013) coloca em negociação a estética clássica da engenharia e a sua noção de uniformidade e simetria dos elementos estruturais, abraçando a ideia da estética “informal” conformada pela colagem dos elementos estruturais, levando-a para uma contestação da comunicação didática da estabilidade baseada na repetição regular dos elementos em proporção. Balmond (2002; 2013) rejeita as crenças modernas de uma racionalidade abstrata que se expressa por meio de ordem geométrica e em hierarquias estruturais. Para Penzel (2002), Balmond busca uma exploração formal no pragmatismo, porém eliminando a ideia de uma tipologia de *grid* estrutural regular conforme propunha Le

Corbusier, fazendo com que todo o processo de projeto ganhe uma dinâmica em que os elementos estruturais e arquitetônicos se tornam menos distinguível (FIG. 10). Para Balmond (2013, p.8, tradução nossa), “se o projeto for realizado utilizando soluções repetidas, não haverá espaço para novas intuições para espaço e forma”.

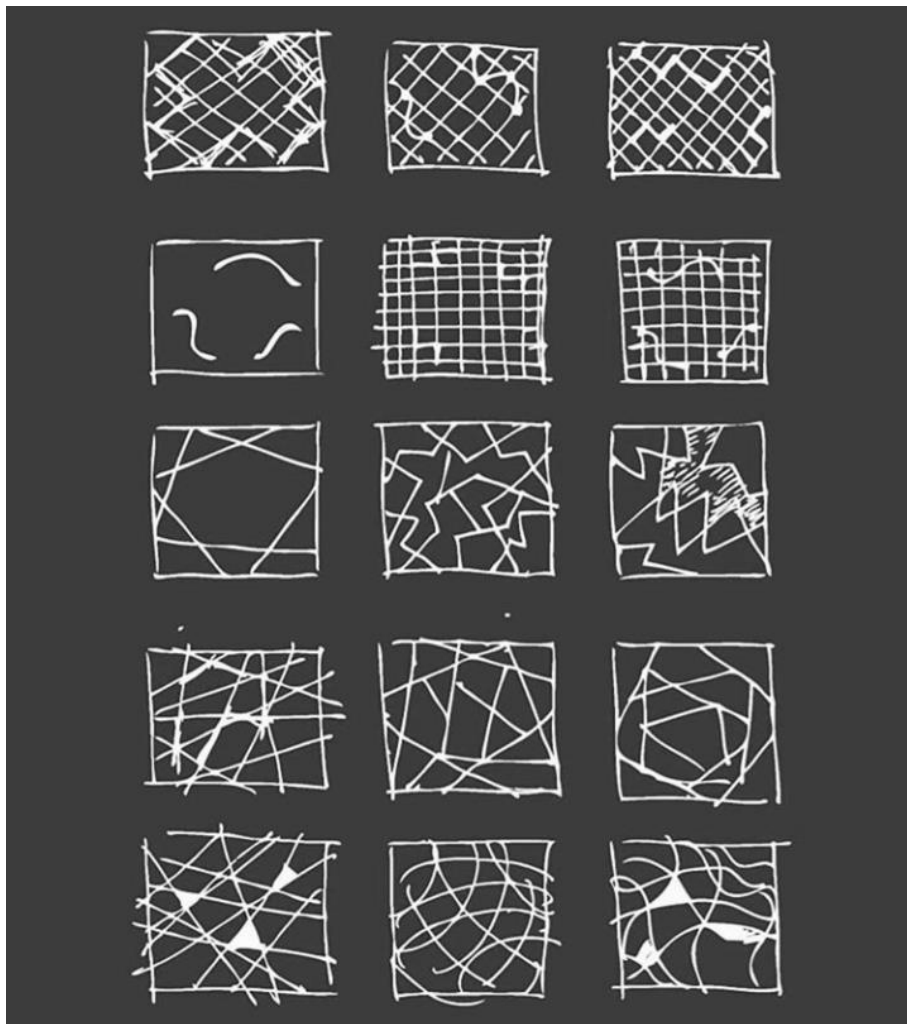


FIGURA 10 - Explorações do *grid* estrutural realizadas por Cecil Balmond.
Fonte: BALMOND, 2002.

As reflexões de Balmond apontam para um clamor discursivo por uma mudança de *status* dos engenheiros, demonstrando um processo de aquisição de capital cultural e uma sensibilização para lidar com parâmetros estéticos e espaciais. Para Aita Flury⁶⁶ (2012, p. 13, tradução nossa), a vantagem de os engenheiros desenvolverem uma “sensibilidade” estática e espacial, poderia ser a possibilidade de se tornar um autor assim como o arquiteto, promovendo uma

⁶⁶ Aita Flury é arquiteta. Entre 2006 a 2010, lecionou projeto e teoria da arquitetura no Instituto de Arquitetura da Universidade de Ciências Aplicadas de Chur na Suíça. Foi curadora da exposição “Diálogos Construtivos: sobre a colaboração entre Arquitetos e Engenheiros na Suíça.”

abordagem em que “a engenharia, assim como a arquitetura também poderia ser glamourosa, emocionante e sexy!”⁶⁷.

No entanto, o engenheiro Hanif Kara⁶⁸ (2016, p. 18) demonstra preocupação com estes processos em que o engenheiro também busca uma abordagem estética em que em uma atmosfera “pouco clara e de profusão sensorial” encoraja uma postura artificial dos chamados “*archineers*” e “*engitects*”. Para Kara (2016), a abordagem dos engenheiros (e arquitetos) para o processo de projeto deve ser ampliada para além de suas características disciplinares, necessitando ser construída uma prática em que ambos precisam ter uma postura dialética que incorpore tecnologia, habilidades em conhecimentos no relacionamento com a natureza e com o ambiente construído, enfatizando que os engenheiros não devem clamar pelo *status* do arquiteto, mas repensarem sobre o tipo de *status* que devem clamar.

2.2.2 Procedimentos não conservativos

Embora tenham sido associadas à produção de uma arquitetura de estética complexa sem considerações construtivas, as ferramentas digitais paramétricas processualmente tornaram possível explicitar as etapas de análise e síntese tanto da arquitetura quanto da engenharia, por meio de procedimentos interativos e iterativos de otimização e geração da forma, além das possibilidade de construção *file-to-factory* trazidas pelas máquinas de fabricação digital⁶⁹. Dessa maneira, a síntese arquitetônica, que antes era realizada apenas pela conjunção de parâmetros arquitetônicos, passou a incluir a *performance* do material, da estrutura e os parâmetros construtivos. Esta mudança de orientação implicou no compartilhamento de uma

⁶⁷ No original: “*They convey what they do and how they wish to be seen engineering can be glamorous, thrilling and sexy – alone the power of the dimensions!*” (FLURY, 2012, p. 217).

⁶⁸ Hanif Kara é engenheiro de estruturas e fundador do escritório de engenharia AKT II. Colabora com diversos arquitetos tais como Norman Foster, David Chipperfield, Rem Koolhaas e Zaha Hadid, atuando em processos de projeto interdisciplinares. Atualmente é professor de Tecnologia Arquitetônica em Harvard. Foi professor, entre 2009 e 2011, no Real Instituto de Tecnologia na Suécia.

⁶⁹ A fabricação digital existe desde a década de 1950, tendo sido largamente utilizada na produção de componentes para a indústria aeronáutica e automobilística, sendo um tipo de produção de objetos físicos a partir de modelos digitais, cujos dados são enviados diretamente para equipamentos controlados numericamente, eliminando etapas intermediárias de produção. No entanto, somente na década de 1990 é que este processo de fabricação começou a ser empregado na construção civil devido à demanda pela produção de componentes não padronizados a partir do aperfeiçoamento de tecnologias de projeto dos sistemas CAD (*Computer-aided Design*) e das tecnologias de fabricação dos sistemas CAM (*Computer-aided Manufacturing*) para a produção de componentes customizados, e em sua maioria de formas não euclidianas.

linguagem comum entre arquitetos e engenheiros, o que demandou dos arquitetos o conhecimento de princípios estruturais básicos, e do engenheiro, a demonstração de uma empatia com relação aos parâmetros arquitetônicos.

Para Bechthold⁷⁰ (2012) depois da ruptura entre engenharia e arquitetura no séc. XVIII, a reconexão de arquitetos e engenheiros no processo de projeto teve como denominador comum a computação, tendo a *performance* computacional como o elo de ligação para a interface entre concepção e produção, uma vez que a simulação estrutural visual permitiu a expansão do escopo da engenharia, e também da arquitetura, possibilitando o desenho de processos mais complexos, que seriam difíceis e antieconômicos com outros métodos. Dessa maneira, surgiram abordagens como a de Rivka Oxman⁷¹ e Robert Oxman⁷² (2010), que em sua publicação *The New Structuralism* propõem uma reversão no modo de pensar o processo de geração da forma, em que, por meio de ferramentas digitais a participação do engenheiro estrutural aparece nos estágios de análise e síntese projetual. Para Pedreschi⁷³ (2008), a abordagem de Oxman e Oxman (2010) foi uma primeira tentativa de definição da incorporação da lógica estrutural do projeto de engenharia à arquitetura através de tecnologias digitais emergentes, por meio de uma linguagem comum entre arquitetos e engenheiros, em que foram abertas possibilidades para um processo de projeto interdisciplinar mais flexível e menos hierárquico.

No entanto, as relações dialógicas de cooperação entre arquitetos e engenheiros emergiram no contexto do uso de ferramentas digitais no âmbito da produção de bens simbólicos, orientadas para uma produção estética inusitada e inovadora para mercados econômico-financeiros em expansão. De acordo com Kara (2016), nestes processos cooperativos, os “arquitetos celebridades” procuraram novos meios de lidar com a arquitetura digital, em que

⁷⁰ Martin Bechthold é atualmente diretor do programa de mestrado e doutorado em Arquitetura de Harvard. É formado em Engenharia com formação complementar em Arquitetura pela Universidade Técnica Rheinisch-Westfalian em Aachen na Alemanha. Obteve seu doutorado em Desing em Harvard e foi colaborador em escritórios como Owings & Merrill, Santiago Calatrava e von Gerkan, Marg & Partner.

⁷¹ Rivka Oxman é arquiteta e professora no Instituto de Arquitetura de Haifa em Israel. Já foi professora convidada na Universidade de Stanford e na Universidade de Tecnologia de Delft.

⁷² Robert Oxman é arquiteto e estuda filosofia da arquitetura, design paramétrico e teoria do design. Atualmente é professor emérito da Faculdade de Arquitetura e Planejamento Urbano do Instituto de Tecnologia de Israel.

⁷³ Remo Pedreschi é engenheiro civil e professor de Tecnologia em Arquitetura da Universidade de Edinburgh e diretor de pesquisa da mesma instituição.

as ferramentas e os gráficos de análise estrutural estavam sendo usados como “truques de festa” para promover o projeto em um nível comercial, mas deslocados dos princípios da “boa engenharia”.

Para Kara (2016), a crise econômica no final da primeira década do século XXI forçou uma revisão das práticas digitais interdisciplinares, não somente tendo ocorrido uma transição discursiva do posicionamento de que “eu construo porque eu posso” para uma busca pelo desenvolvimento de uma abordagem cooperativa com uma integração sistemática de parâmetros de materialidade, racionalidade construtiva e economia. De acordo com John Ochsendorf⁷⁴ (2016, p.11, tradução nossa), o processo de síntese projetual cooperativa entre arquitetos e engenheiros deve ser delimitado pela ética, “para proteger a segurança da vida humana, para obter uma eficiência de recursos e para buscar soluções para clientes com um orçamento limitado”.

Kara tem se engajado em realizar uma abordagem discursiva para as práticas da engenharia em cooperação com a arquitetura, tendo duas publicações importantes acerca do tema. Em *Interdisciplinary Design: New Lessons from Architecture and Engineering* (2012), Kara apresenta um discurso acerca de uma redefinição das fronteiras disciplinares provocada pela tecnologia e seu potencial emergente de interação. Na edição da importante publicação de arquitetura *Architectural Design* (na série *AD Smart*), em que é o editor convidado, *Design Engineering Refocused* (2016), Kara propõe fazer uma ontologia e delinear um horizonte para a prática dos engenheiros de estruturas, definindo-a como uma combinação entre a ciência e “os estímulos visuais”. Para Ochsendorf (2016), a publicação teve como objetivo demonstrar as oportunidades trazidas pelas ferramentas digitais que permitem os engenheiros de estruturas serem colaboradores no processo de síntese projetual.

Para Kara (2016, p.51), o processo de *design engineering* tem se tornado mais do que uma abordagem profissional, mas representa um modelo prático e teórico para um engajamento “ativo e profundo” com a arquitetura e outras disciplinas. Kara (2016) ressalta que nas últimas duas décadas, os engenheiros desenvolveram uma aplicação mecanicista dos

⁷⁴ John Ochsendorf é engenheiro de estruturas e professor nos Departamentos de Arquitetura e Engenharia Civil no MIT (Massachusetts Institute of Technology).

processos digitais analíticos para projetos que privilegiavam mais a experiência do que a *performance*, porém a abordagem do *design engineering* deve ser focada menos em uma expressão individual do arquiteto e mais em privilegiar os aspectos em benefício do meio ambiente e da comunidade. Nesta revisão das sobreposições e dos limites do campo, algumas experiências apontam para um resgate conceitual dos trabalhos de arquitetos-engenheiros como Frei Otto, Pier Luigi Nervi e Buckminster Fuller, buscando a conciliação de uma abordagem científica e artística ampliada pelas possibilidades trazidas pelas ferramentas digitais paramétricas e pelas oportunidades de simulação de *performance*.

Dessa maneira, na busca pelo desenvolvimento de processos de projeção não conservativos utilizando ferramentas digitais, a utilização dos conceitos de processo paramétrico e *performance* devem rejeitar uma orientação para uma prática de monólogo voltada para a plasticidade da forma, buscando brechas para uma reconstrução dos mecanismos de produção e reprodução do campo da arquitetura, e das relações entre arquitetos e engenheiros, de tal maneira que as ferramentas digitais sejam instrumentos facilitadores para o desenvolvimento de relações dialéticas de conversa na prática de projeção arquitetônica, tendo como horizonte substituir uma orientação plasticista por uma orientação tectônica. Sendo assim, iremos buscar nas definições de modelo paramétrico e *performance*, e na sua transposição para a prática de projeção arquitetônica, realizar uma reflexão sobre seus apontamentos e possibilidades para a construção de relações de conversa para uma prática de projeto tectônica.

2.2.2.1 Modelo paramétrico

O conceito de parâmetro vem da matemática e significa uma forma de representar uma geometria por meio de equações governadas por parâmetros. O parâmetro constitui-se de um elemento variável e quantificável, com sistemas de *input* e *output*, que de forma interativa podem criar relações com outros parâmetros, configurando um sistema complexo de geometria associativa. Este sistema é desenvolvido em um espaço paramétrico que representa um espaço de possibilidades. Assim, a construção de um modelo paramétrico constitui-se de métodos para se lidar com essas possibilidades, controlando os componentes

e a relação entre eles, de tal maneira a ordenar a estruturação e a dinâmica do sistema.

Nas práticas conservativas de projeção orientadas pelas ferramentas digitais, a transposição do conceito de processo paramétrico priorizou os aspectos formais, reduzindo a abordagem paramétrica a um preceito formalista de exploração de geometrias não euclidianas constituídas de *splines*⁷⁵ e *NURBS*⁷⁶, tal qual defende Schumacher (2008) em seu manifesto em defesa do “parametricismo”. No entanto, esta abordagem formalista foi refutada por autores como Achim Menges⁷⁷ e Sean Ahlquist⁷⁸ (2011), que defenderam uma abordagem processual por meio do desenvolvimento de um pensamento computacional, em que o principal desafio não está em dominar as técnicas de projeto, mas acertar um modo de pensamento computacional para a projeção. Para Menges e Ahlquist (2011), a prática de projeto não está apenas na seleção de critérios, mas está na modelagem dos próprios argumentos, tanto em termos técnicos computacionais quanto em termos teóricos, materiais e arquitetônicos. O projetista é o autor das regras com descrições implícitas e explícitas para o desenvolvimento da forma, e as ferramentas computacionais são apenas instrumentos facilitadores para a tomada de decisões complexas.

Desse modo, para que as práticas de projeção digitais sejam orientadas para procedimentos não conservativos, é fundamental que seja realizada uma abordagem crítica em relação ao projeto computacional calcada em fundamentos históricos e práticos do campo da arquitetura e dos campos inter-relacionados, refletindo um amadurecimento recíproco entre o discurso intelectual e o avanço técnico. Danil Nagy⁷⁹ (2009) acredita que, ao focar em aspectos formalistas em sobreposição a conceitos mais amplos como responsabilidade

⁷⁵ *Spline* é uma curva definida matematicamente por dois ou mais pontos de controle.

⁷⁶ O *NURBS* (*Non Uniform Rational Basis Spline*) é uma representação matemática de superfícies livres usado em ferramentas digitais para gerar e representar curvas e superfícies livres. O desenvolvimento desses modelos em *softwares* computacionais ampliou o repertório de representação de formas digitalmente, por se aproximar de um traço mais fluido, como no desenho à mão. Ele permitiu o desenvolvimento de formas cada vez mais complexas, tornando a criação digital de formas topológicas computacionalmente possíveis.

⁷⁷ Achim Menges é arquiteto formado na AA School of Architecture e professor da Universidade de Stuttgart, onde ajudou a criar o Instituto de Design Computacional e Construção em 2008.

⁷⁸ Sean Ahlquist é arquiteto e professor assistente da Universidade de Michigan na Faculdade Taubman de Arquitetura e planejamento Urbano.

⁷⁹ Danil Nagy é professor na graduação do curso de Arquitetura da Universidade de Columbia e no Pratt Institute, tendo como principais áreas de estudo visualização arquitetônica, design generativo e aplicações para inteligência artificial. Foi responsável pela instalação Hy_Fi, realizada em 2014 no MoMA PS1, Nova York, cujo objetivo foi experimentar um ciclo de produção sustentável na construção civil.

política e social, o “parametricismo” corre o risco de se tornar uma reencarnação do movimento modernista, com a racionalidade e a otimização substituindo a máxima da “forma segue a função”.

Logo, para que as possibilidades de desenvolver modelos paramétricos auxiliados por computador se efetivem enquanto práticas não conservativas é necessário que haja um desdobramento na convergência de um exercício entre teoria e prática, em que o potencial do pensamento computacional no processo de projeto habilite e desenvolva processos de reflexão acerca de algumas preocupações disciplinares centrais. Para Menges e Ahlquist (2011), a execução de métodos computacionais paramétricos deve ser desenvolvida no intuito de solucionar as complexidades existentes na inter-relação e na interdependência de estruturas materiais e ambientes dinâmicos, relacionando materialidade, espacialidade e contexto.

A abordagem paramétrica traz possibilidades de desenvolvimento de processos interdisciplinares de maneira não linear, abarcando as possibilidades de circularidade de respostas decorrentes da interação e da iteração. Dessa maneira, o potencial da interferência do processo paramétrico na relação entre arquitetos e engenheiros é propiciar um ambiente reflexivo para o desenvolvimento de relações dialógicas, abarcando a complexidade sociocultural, espacial, ambiental e construtiva requerida para cada processo de projeção arquitetônica a ser desenvolvido.

A transposição do conceito de paramétrico para a arquitetura pressupõe a construção de modelos sistêmicos em que o arquiteto muda o seu papel de concepção de um objeto único e passa a desenhar a estrutura do processo, em que várias soluções serão possíveis dentro de um universo de possibilidades. Assim, no processo de projeção paramétrica, o arquiteto não projeta necessariamente uma forma específica, mas um sistema capaz de gerar uma multiplicidade de soluções, com variações determinadas pela seleção dos parâmetros. A manipulação da forma passa a englobar a interação, em que é possível visualizar uma variedade de soluções, e a iteração, em que o projetista pode avaliar e melhorar as soluções continuamente. A abordagem paramétrica traz para o processo de projeto a possibilidade de

se desenvolver um modelo sistêmico baseado em informações, em que as regras e os procedimentos se tornam explícitas, orientando o processo para a negociação de parâmetros. Os antecedentes analógicos da aplicação do conceito de parametria na arquitetura são anteriores a sua prática digital, tendo sido primeiramente realizada pelo o arquiteto italiano Luigi Moretti (DAVIS, 2013) ainda nos anos 1940, realizando uma abordagem sistêmica da projeção, a que ele denomina de “arquitetura paramétrica”. Moretti utilizou o projeto de um estádio como exemplo, demonstrando que este poderia ser o resultado da combinação de parâmetros tais quais o ângulo de visão e o custo do concreto (FIG. 11).

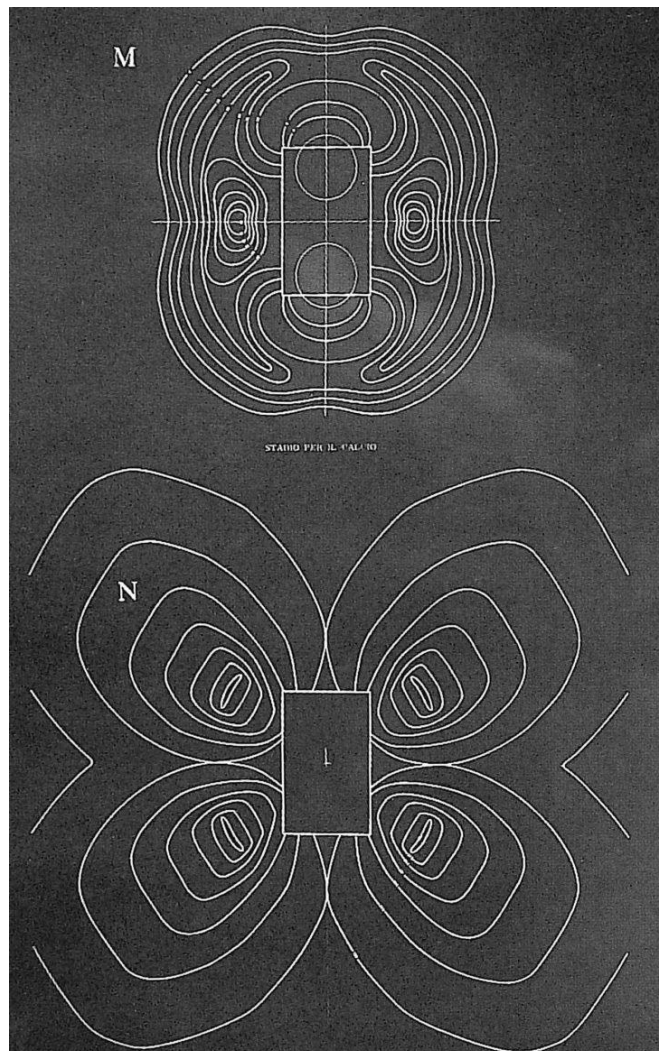


FIGURA 11 - Plantas para o projeto do estádio versões M e N
Fonte: DAVIS, 2013 *apud* Bucci; Mulazzani 2000, p. 114.

No entanto, com relação à aplicação de parâmetros estruturais para a concepção da forma, a projeção paramétrica analógica é anterior à construção realizada por Moretti. Ainda no final

do séc. XIX, o arquiteto Antoni Gaudí já utilizava modelos físicos análogos aos modelos de Robert Hooke (1635-1703)⁸⁰, empregando a curva catenária paramétrica para projetar. Para encontrar a forma catenária ideal, Gaudí utilizava a gravidade como parâmetro conformador do processo de projeto. Com estes modelos, ao mudar qualquer parâmetro, Gaudí conseguia gerar outras versões para o projeto, mantendo o objetivo principal dos modelos, que era o de gerar estruturas trabalhando em puro estado de compressão.

O método de computação analógico por meio de modelos físicos exploratórios também foi utilizado, e ampliado por Frei Otto na segunda metade do séc. XX. Otto desenvolveu processos físicos os quais denominou de *form finding*⁸¹, que, dentre outros parâmetros, buscava encontrar superfícies mínimas derivadas de modelos com bolhas de sabão. Frei Otto dedicou seus estudos ao desenvolvimento de estruturas leves por meio de modelos experimentais complexos para testar e aperfeiçoar formas submetidas à tração (FIG. 12), atraído em parte pela redução de custo, mas também pelo aspecto sustentável.

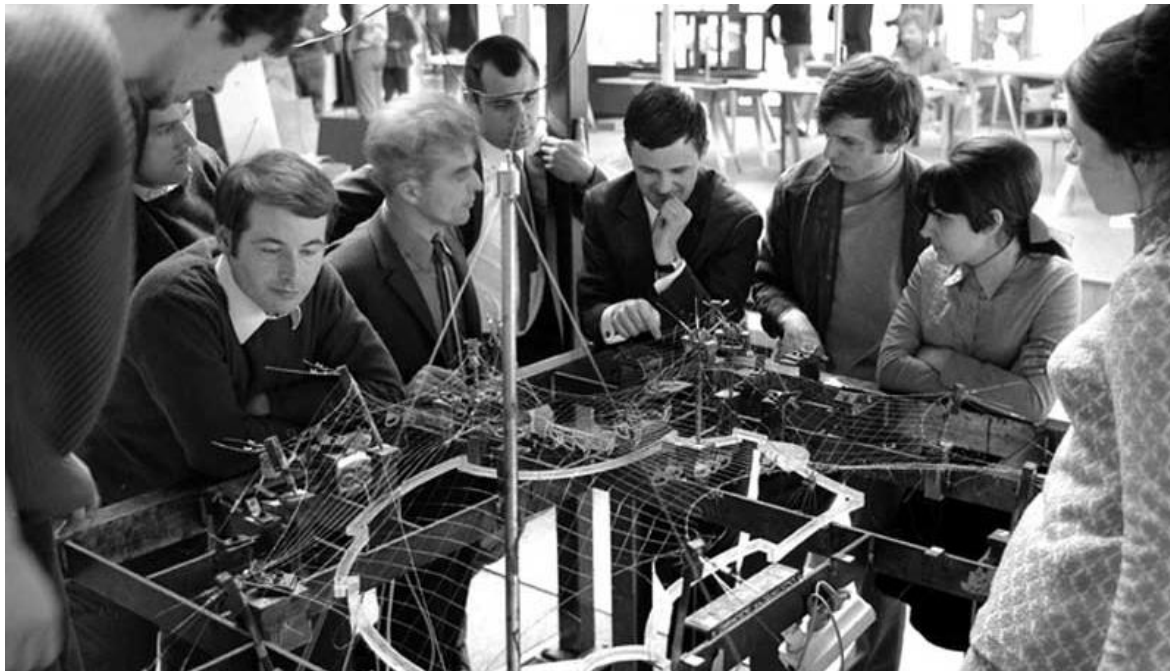


FIGURA 12 - Modelo experimental desenvolvido por Frei Otto e equipe.
Fonte: MENGES, 2015.

⁸⁰ Robert Hooke desenvolveu a lei da elasticidade, também conhecida como Lei de Hooke, em que estabelece que as deformações sofridas pelos corpos são proporcionais às forças que são aplicadas sobre eles. Sua lei deu origem a Teoria da Elasticidade Linear, amplamente utilizada pela engenharia de estruturas para o estudo de sólidos submetidos a pequenas deformações, tendo os deslocamentos e deformações tratados de forma linear.

⁸¹ *Form-finding* é o processo de busca da forma estaticamente estável com princípios de otimização da geometria estrutural.

Na prática digital, os processos paramétricos combinados com as possibilidades de visualização e simulação de acordo com Picon (2010) têm influenciado o desenvolvimento da arquitetura desde os anos 1950, com o desenvolvimento de sistemas experimentais de projeção baseados na teoria dos sistemas e nas possibilidades trazido pelos computadores eletrônicos, tendo estes se constituído como ferramentas primárias para facilitar a lógica da solução de problemas e tomadas de decisão. O desenvolvimento de processos paramétricos de projeção em ambiente computacional teve início nas décadas de 60 e 70 com o desenvolvimento de sistemas gráficos de abordagem sistêmica como o *Sketchpad*, GRASP e LOKAT.

O *Sketchpad* foi desenvolvido no MIT por Ivan Sutherland, e, posteriormente, o GRASP foi desenvolvido em Harvard GSD por Eric Teicholz, que havia trabalhado no projeto do *Sketchpad*. O *Sketchpad* definiu os fundamentos para os métodos computacionais paramétricos, implantando conceitos de parâmetros, geometria associativa e organização sistêmica baseada em regras. Para isso, o *Sketchpad* aplicava a ideia de restrição para testar e flexibilizar as relações entre geometrias, que poderiam ser desenhadas parametricamente representando aspectos de forma, espaço e estrutura (FIG. 13). Já o sistema GRASP era composto por um sistema generativo utilizando procedimentos randômicos baseados nas restrições impostas pela inter-relação de estrutura, exposição solar e organização programática. O LOKAT também foi desenvolvido em Harvard GSD e introduziu a ideia de avaliação ao processo, trazendo o conceito de otimização para as soluções geradas. De acordo com Menges e Ahlquist (2011), essas possibilidades trouxeram um avanço para a visão cibernética da relação homem-máquina, trazendo para a síntese projetual uma condição dialógica.



FIGURA 13 - Operador utilizando o programa *Sketchpad*.

Fonte: SUTHERLAND, 1963.

No entanto, os experimentos paramétricos dos anos 1960 e 1970 tiveram um hiato de desenvolvimento em decorrência das restrições operacionais, do alto custo, e da própria mudança de orientação teórica e prática do campo, tendo sido retomados somente nos anos 1990. A disseminação dos processos de projeto paramétrico se deve ao desenvolvimento de interfaces de *script* em *softwares* de representação como o AutoCad, lançado nos anos 1980. Isso possibilitou que em 1992, Mark Burry e Jane Burry (2010), na ocasião do projeto da Sagrada Família, pudesse programar hipérboles em um processo digital análogo ao processo analógico desenvolvido por Gaudí. Entretanto, as interfaces de programação no AutoCad eram interfaces textuais, o que não dialogava diretamente com a linguagem de representação arquitetônica, predominantemente visual. Dessa maneira, foi com o desenvolvimento de ferramentas de programação visual por meio de diagramas como o *Grasshopper*⁸², lançado em 2007, que teve seu emprego popularizado na prática arquitetônica.

Os projetos arquitetônicos baseados em modelos paramétricos e algorítmicos⁸³ digitais propiciaram aos arquitetos trabalharem como mediadores das etapas de análise e síntese,

⁸² O *Grasshopper* é um *plugin* desenvolvido para o *software Rhinoceros 3D* para projeção através de parâmetros de geometria com dados de entrada e saída, que são transferidos através de relações associativas produzidas por meio de equações matemáticas que podem ser alteradas, sendo que qualquer alteração realizada se propaga por todo o modelo. Os dados são sempre armazenados em parâmetros, que podem ser flutuantes ou conectados a um componente como objetos de entrada e saída, passados de componente para componente através de fios de conexão. Ao contrário dos modelos de representação de geometria não associativa, na abordagem paramétrica as soluções para um mesmo projeto podem ser diversas, tendo o projetista um maior ou menor controle sobre o modelo.

⁸³ A linguagem algorítmica possibilita acrescentar programação textual aos diagramas, representando um acréscimo de complexidade ao modelo paramétrico, permitindo a produção de geometrias através de variáveis, funções condicionais e regras gramaticais. Por meio de iteração, estes processos generativos podem produzir diferentes resultados através de técnicas de otimização e simulação de *form-finding*. Os algoritmos genéticos são uma variável desta abordagem em que parâmetros de avaliação são condicionais para as iterações de

elegendo os critérios de seleção e avaliação, ou até mesmo desenvolvendo algoritmos e *softwares*. Esse processo possibilita a inclusão de informações ao modelo, podendo ser acrescentados parâmetros para além dos formais, mas também ambientais, espaciais, socioculturais e econômicos. Dessa forma, a escolha dos parâmetros de avaliação pode se constituir em um processo aberto e colaborativo, podendo ser desenvolvido por equipes multidisciplinares e, potencialmente, vir a incluir os usuários no processo. Logo, a espacialidade e a forma plástica desenvolvida emergem do resultado de uma organização sistêmica complexa com parâmetros de causa atuando em uma condição performativa que pode prescindir de conceitos, informações materiais e tectônicas para sua formação, representando uma mudança de orientação da representação para processos computacionais que exploram a manipulação de informações e o desenvolvimento de processos complexos multidisciplinares. Nestes processos as definições são múltiplas e abarcam diversos campos de conhecimento, podendo inclusive ser orientados por aspectos de *performance* material, espacial e construtiva, tal qual iremos problematizar a seguir.

2.2.2.2 Performance

Conceitualmente, o termo “*performance*” tem origem no latim, tendo sua etimologia conformada pelo prefixo “*per*”, que significa movimento através de, proximidade, intensidade ou totalidade, mais “*formáre*”, que representa formar, dar forma, estabelecer. Na língua inglesa o termo se refere tanto a procedimentos artísticos⁸⁴ quanto ao ato de homens⁸⁵ ou máquinas⁸⁶ desempenharem algo (PERFORMANCE, 2019). *Performance*, no campo artístico, é utilizada para designar um movimento ocorrido em meados do século XX, em que a arte produzida pela academia começou a ser questionada, tendo ocorrido a invenção de novos suportes que levaram a manifestações artísticas como o Futurismo e o Dadaísmo, calcadas em métodos que substituíram o paradigma da representação pela presença.

“aprendizado, crescimento e adaptação” com a intenção de produzir uma solução ótima. Sendo assim, o processo paramétrico está diretamente ligado à manipulação de formas geométricas associativas e o algorítmico à manipulação por meio de programação de *scripts*, sendo o paramétrico interativo e o algorítmico iterativo.

⁸⁴ “*An act of presenting a play, concert, or other form of entertainment*” (PERFORMANCE, 2019, [n.p.]).

⁸⁵ “*The action or process of performing a task or function*” (PERFORMANCE, 2019, [n.p.]).

⁸⁶ “*The capabilities of a machine, product, or vehicle*” (PERFORMANCE, 2019, [n.p.]).

No entanto, foi em meados dos anos 1960 que surgiu uma modalidade artística interdisciplinar, denominada Arte Performática, que possibilitava a combinação de várias manifestações artísticas tais como música, teatro, poesia, fotografia, cinema e artes plásticas. A arte performática prescinde de um roteiro e pode ser realizada em diferentes locais, ocorrendo com ou sem a participação do público, em que, neste caso, depende do registro por meio de fotografia, vídeo ou memorial descritivo. O conceito de improvisação foi incorporado aos movimentos artísticos de *performance*, surgindo uma derivação destas manifestações denominadas de *happening*. Como exemplo, podemos citar o trabalho do músico norte-americano John Cage⁸⁷, um dos pioneiros do *happening*, que na performance “Variations V” (FIG. 14), realizada em 1965 juntamente com o músico David Tudor para a companhia de dança de Merce Cunningham, desenvolveu um processo interdisciplinar entre homens e máquinas, em que o som produzido era afetado pelo movimento coreografado⁸⁸.

Para o linguista Paul Zumthor (2007), nos movimentos artísticos baseados em *performance*, mais do que a obra, o que interessa é o gesto provocativo, que pode ser feito no intuito de tensionar os costumes, a política, as relações ou a própria arte. Dessa maneira, a linguagem *performática* consiste em uma linha que se interliga à comunicação poética, em que o conhecimento daquilo que se transmite afeta o que é conhecido, modificando o próprio conhecimento. Zumthor (2007) estabelece que as premissas fundamentais para a *performance* enquanto processo se trata primeiro do seu reconhecimento e a concretização; segundo, da sua emergência em um contexto cultural e situacional, devendo ser considerado o aspecto do tempo; e, terceiro, de uma conduta na qual o sujeito assume aberta e

⁸⁷ John Cage (1912-1992) foi compositor, músico, teórico, artista e filósofo, tendo sido um importante artista de vanguarda no campo da dança moderna no período pós- Segunda Guerra. John Cage foi um dos diretores da *Black Mountain College*, cuja experiência veremos mais adiante.

⁸⁸ Para a realização da *performance*, foram estabelecidos dois sistemas de som. No primeiro, foi montado um sistema de fotocélulas direcionais voltadas para as luzes do palco, de modo que os dançarinos disparavam sons enquanto cortavam os feixes de luz com seus movimentos. Um segundo sistema usou uma série de antenas. Quando um dançarino chegava a quatro pés de uma antena, um som resultava. Dez fotocélulas foram ligadas para ativar os gravadores de fita e os rádios de ondas curtas. Imagens de filmes e imagens de televisão manipuladas foram projetadas em telas atrás dos dançarinos. Foi criado um sistema de pontuação lançando moedas para determinar cada elemento, e este consistia em trinta e cinco "observações", delineando a estrutura, os componentes e a metodologia. A pontuação específica do som mudaria a cada apresentação, uma vez que foi criada por antenas de rádio que respondiam aos movimentos dos dançarinos. Os equipamentos de som eram operados para modificar e determinar os sons finais (CAGE, 2004).

funcionalmente sua responsabilidade.



FIGURA 14 - *Performance "Variations V"*.

Fonte: CAGE, 2004.

A transposição do conceito de *performance* para a prática de projeção arquitetônica ficou mais conhecida pelo termo *Performance-based Design*, e a definição dada por Rivka Oxman (2006), que o considera como um processo de formação impulsionado por um desempenho desejado. O conceito está intrinsecamente associado à avaliação e síntese da forma arquitetônica orientada pelo desempenho material, estando relacionados principalmente ao desenvolvimento de processos de otimização. Os processos de otimização envolvem uma revisão nas práticas de projeção e nas relações entre arquitetos e engenheiros, podendo ser distinguida por duas abordagens, assim como proposto por Oxman (2006), divididas em processos do tipo *top-down* ou *bottom-up*.

Os processos do tipo *top-down* conservam os procedimentos tradicionais de projeção em que o arquiteto concebe uma forma, mas por essa apresentar uma complexidade construtiva, é necessário que o engenheiro desenvolva métodos técnicos construtivos computacionais visando à viabilidade e à redução de material de tal maneira que haja uma interferência

mínima na estética proposta pelo arquiteto. Para Adriaenssens⁸⁹ et al (2014), os processos de otimização do tipo *top-down* podem estar relacionados com a alteração da topologia ou das seções transversais, em que os objetivos principais estão relacionados à minimização do material e do peso da estrutura, por meio da diminuição das deflexões ou vibrações dinâmicas, e, a maximização da rigidez, buscando uma eficiência estrutural na relação entre carregamento e geometria estrutural. Nesse processo, de acordo com Oxman (2006), forças externas são aplicadas na condução de um processo de formação, podendo incluir parâmetros ambientais, financeiros, socioculturais, ecológicos e tecnológicos. Esses processos de colaboração entre arquitetos e engenheiros orientados para a estrutura enquanto ornamento pode ser vistos em processos de projeto desenvolvidos digitalmente por Rem Koolhaas e Cecil Balmond, Toyo Ito e Mutsuro Sasaki, Zaha Hadid e Hanif Kara.

Os processos orientados para otimização do tipo *bottom-up*, também conhecidos como processos generativos, são caracterizados por procedimentos em que os critérios de avaliação são os princípios geradores da forma, impulsionados pelos parâmetros e seu desempenho, e potencialmente integrados aos processos de formação, numa condição de integração direta da linguagem digital em que foi gerado com o seu resultado. O processo de síntese da forma ocorre por meio de técnicas como *form-finding*, algoritmos evolutivos⁹⁰, otimização topológica⁹¹ (FIG. 15), dentre outras. Nestes procedimentos, arquitetos e engenheiros desenvolvem relações cooperativas e interagem conjuntamente com os parâmetros geradores e selecionam formas emergentes resultantes do processo, podendo posteriormente incluir técnicas de otimização ao processo. O desenvolvimento de pacotes baseados nas técnicas de análise estrutural por Método dos Elementos Finitos (MEF) em *softwares* paramétricos propiciou que o processo de representação, medição, avaliação e modificação da estrutura fosse integrado de maneira interativa e iterativa ao processo de projeto arquitetônico, tanto em processos do tipo *top-down* quanto em processos do tipo

⁸⁹ Sigrid Adriaenssens é engenheira civil. Atualmente é diretora do programa de Mecânica, Material e Estruturas e da graduação em Arquitetura e Engenharia da Escola de Engenharia da Universidade de Princeton.

⁹⁰ Os algoritmos evolutivos utilizam técnicas inspiradas na biologia evolutiva, tais como hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação para encontrar soluções otimizadas.

⁹¹ O processo de otimização topológica consiste em encontrar a mínima quantidade de material necessária para suportar determinada solicitação de carga. Nos processos computacionais, dada uma quantidade de apoios em uma determinada área sob um carregamento específico, o *software* se encarrega de eliminar todo material que não contribui para a sustentação do elemento, restando apenas as linhas de força responsáveis pela manutenção de seu equilíbrio interno e por transmitir a carga recebida aos apoios.

bottom-up, sendo possível conciliar múltiplos parâmetros à concepção do projeto. A coordenação de múltiplos parâmetros torna o processo complexo e requer a participação interdisciplinar para análise e avaliação.

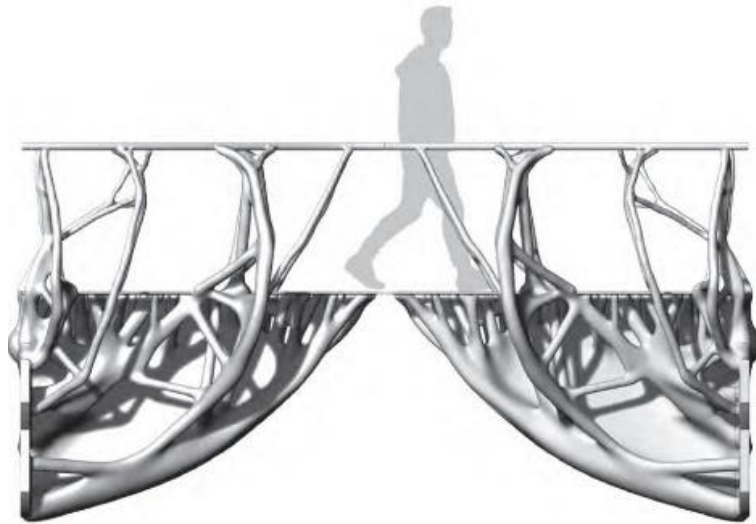


FIGURA 15 - Geração da forma por meio de técnica de otimização topológica.
Fonte: BRANDT, 2016.

No entanto, a interpretação de *performance* limitada a processos de otimização reduz o conceito aos seus desdobramentos técnicos, o que o reduz a aspectos quantitativos, critérios objetivos e à geração de possibilidades estéticas improváveis de serem projetadas fora do ambiente computacional. Na publicação *Theories of the Digital in Architecture*, Oxman e Oxman (2014), reflete sobre as oportunidades trazidas pelo processo baseado em *performance* para além da formação, podendo se constituírem em uma oportunidade para os arquitetos redefinirem a arquitetura como uma prática material, desenvolvendo habilidades de modelar sistemas materiais estruturais como sistemas tectônicos, renovando as relações entre arquitetos e engenheiros de estruturas, e desenvolvendo novas conexões entre concepção e produção.

Grobman⁹² (2012) considera que a aplicação do conceito de *performance* na prática de projeção arquitetônica pode ser categorizada em três dimensões: empírica, cognitiva e perceptiva. A dimensão empírica é aquela em que o foco está direcionado para as

⁹² Yasha Jacob Grobman é arquiteto e reitor associado da Faculdade e Planejamento Urbano do Instituto de Tecnologia de Israel. Tem como foco de pesquisa *design* computacional e performático voltados para arquitetura, *design* e fabricação.

propriedades físicas; a dimensão cognitiva se refere à cognição do espaço; e, a dimensão perceptiva está relacionada com os aspectos simbólicos e com as sensações provocadas. No entanto, a orientação dos processos de projeção baseados em *performance* computacional desenvolvidos a partir dos anos 1990 tem sido essencialmente empírica, direcionada para os aspectos quantitativos que medem o desempenho físico da forma. Desta maneira, considerando uma orientação para práticas não conservativas, seria possível incluir também as dimensões cognitivas e perceptivas em uma avaliação de *performance*?

Para Branko Kolarevic⁹³ (2014), o desenvolvimento da prática orientada para a *performance* na atualidade se distanciou das ideias visionárias desenvolvidas nas décadas de 1960 e 1970, em que o conceito de *performance* era tratado ao mesmo tempo conceitualmente e tecnologicamente. A primeira ferramenta digital de análise de *performance* foi desenvolvida por um grupo de pesquisadores nos anos 1960 liderados por Thomas Maver⁹⁴, realizado no laboratório ABACUS (*Architecture and Building Aids Computer Unit*) da Universidade de Strathclyde no Reino Unido, em que o Departamento de Arquitetura em colaboração com o Departamento de Ciência do Edifício desenvolveu a PACE (*Package for Architectural Computer Evaluation*). De acordo com Kolarevic (2014), o programa aferia não somente a *performance* de um único parâmetro, mas realizava uma “interação conversacional” por meio de um terminal do tipo *teletypewriter*. O programa mensurava parâmetros espaciais, ambientais, de custo e da “atividade” da *performance*. O componente de *performance* espacial mensurava a relação entre o uso pretendido, a área proposta e a volumetria. O componente de *performance* ambiental calculava o tamanho dos ambientes em função do ganho e da perda de calor. Já o módulo de “atividade” da *performance* processava o grau em que as relações entre os parâmetros satisfaziam aos objetivos propostos. Após a avaliação, o programa instruía o projetista sobre como alterar informações geométricas ou de construção, como modificar o conceito de projeto para melhorar a *performance* e enviar o projeto modificado para reavaliação. Caso o projetista já estivesse satisfeito com a solução, o ciclo de interação

⁹³ Branko Kolarevic tem formação interdisciplinar em Arquitetura e Engenharia (diploma *engineer in architecture degree*) pela Universidade de Belgrado, com doutorado e mestrado em Design pela Universidade de Harvard. Atualmente é professor na Universidade de Calgary, da cadeira de Design Integrado, e codirige o Laboratório de Design Integrativo (LID). Seu foco de pesquisa está nas áreas de Fabricação Digital e *performance*.

⁹⁴ Thomas Maver é arquiteto e professor pesquisador da Mackintosh School of Architecture. Professor Emérito do Departamento de Arquitetura da Universidade de Strathclyde. É pesquisador do campo de tecnologia da informação aplicada à arquitetura desde a década de 1970.

poderia ser interrompido a qualquer momento e o programa atualizaria os valores médios utilizados nas avaliações (FIG. 16). Ao final, a proposta era que o ciclo de “interação entre homem e máquina” levaria a uma convergência de soluções “ótimas” para a síntese arquitetônica. Dessa maneira, Maver (1974) fundamentou que os paradigmas para a projeção baseada em *performance* deveria se basear em três conceitos principais: no desenvolvimento de processos e não de produtos; na continuidade do processo para além da construção, possibilitando adaptações com o uso; e, em tomadas de decisões de projeto democráticas, podendo, portanto, ser abertas para clientes e usuários⁹⁵.

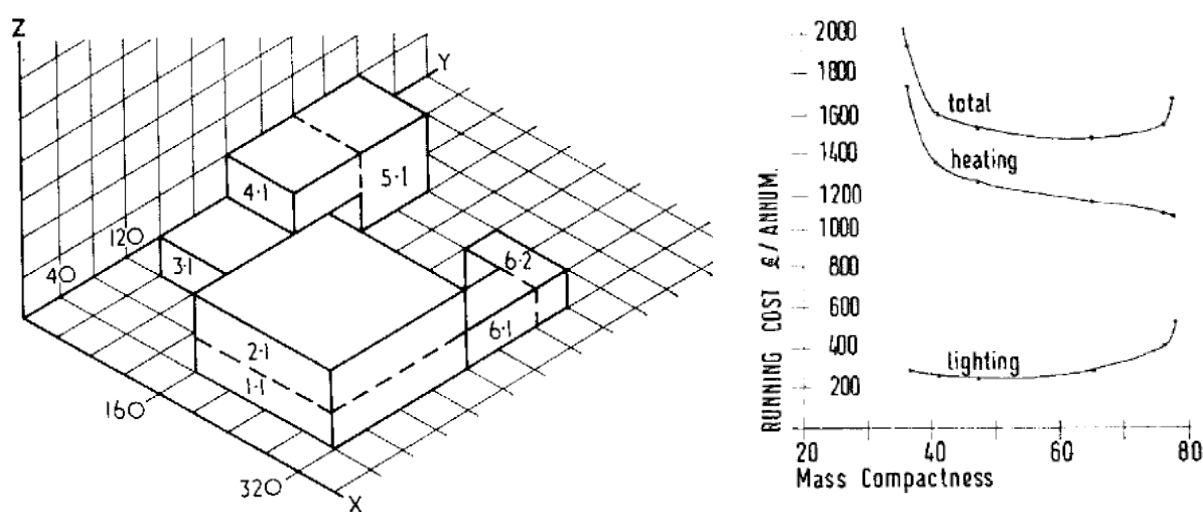


FIGURA 16 - Esquema volumétrico inicial no PACE relacionando espaço e função, e saída de dados.
Fonte: MAVER, 1974.

Dessa maneira, tendo como referência o desdobramento do termo *performance* nas artes, na comunicação e nas ideias desenvolvidas nos anos 1960 e 1970 na prática de projeção e na sua relação com a computação, vemos que o termo sugere uma interação processual entre o contexto situacional e temporal, orientados para a produção de uma estética ancorada na ética. Sendo assim, sugerimos que o desenvolvimento de processos baseados em *performance* orientados para práticas não conservativas deve incorporar o potencial de simular processos dialógicos e reflexivos de projeção, incluindo não somente uma análise empírica de dados para informar a síntese projetual, mas também incluindo dimensões

⁹⁵ Este conceito de abertura do processo de projeto foi abordado anteriormente nas proposições de Yona Friedman na proposição dos princípios da Ville Spatiale (1958) e do “Flatwriter” (1967); e de Cedric Price, na concepção do Fun Palace (1960), que abordava sobre a impossibilidade de um controle totalizado do arquiteto, devendo este prever um grau de indeterminação para possibilitar as mudanças temporais.

cognitivas e perceptivas relativas à concepção do espaço.

2.2.2.3 Tectônica digital

A prática de projeção paramétrica e orientada à *performance* sugere o desenvolvimento de uma prática processual, cooperativa e material, o que nos leva a considerar uma reorientação para processos de projeção tectônicos facilitados pelas ferramentas digitais. O termo “tectônico” na arquitetura suporta uma multiplicidade de interpretações. A mudança de definição das relações simbólicas entre arquitetura e estrutura definiu a evolução do conceito de tectônica em diferentes períodos históricos, em que uma maior ou menor ênfase neste aspecto depende do contexto e dos valores culturais.

Na etimologia grega, o termo “tectônico” deriva da palavra “*tekton*” que significa carpinteiro ou construtor. O termo se referia a um artesão que trabalhava com materiais pesados, como pedra e madeira, exceto o metal. O termo “*tekton*” também tinha uma conotação poética, em que o artesão explorava o potencial de expressão da técnica construtiva. Sendo assim, o historiador de arquitetura Kenneth Frampton⁹⁶ (1995) define tectônica como a poética da construção, em que o termo “poética” se refere à conexão entre uma definição cultural dos elementos da arquitetura e suas relações, estando arte e ofício intricadamente conectados.

No entanto, outras definições para o termo também são aceitas no campo. Gottfried Semper (1803-1879) introduziu uma interpretação cultural para a tectônica e explica as origens da arquitetura por sua divisão em quatro elementos: a lareira, o telhado, o invólucro e a plataforma base, em que cada um deles pode ser atribuído a um ofício. A lareira simboliza o fogo, a reunião de grupos, e está relacionada ao trabalho metalúrgico e cerâmico; o telhado representa o trabalho da carpintaria; o invólucro, a prática têxtil; e a plataforma base, ao trabalho de estereotomia (SEMPER, 1989). Karl Böticher (1806-1889) classifica tectônica como a ciência de montar partes individuais rígidas que correspondem à forma e à estrutura a um todo, que corresponde ao edifício (FRAMPTON, 1995). Já para Eduard Sekler (1920-2017), um edifício é considerado tectônico se a resistência estática da estrutura está expressa

⁹⁶ Kenneth Frampton (1930-) é arquiteto, crítico, historiador e professor de Arquitetura na Graduate School of Architecture and Planning da Universidade de Columbia em Nova York.

de maneira descritiva (SEKLER, 1965). Dessa maneira, identificamos que embora haja uma variedade de abordagens e definições para o termo, as principais questões pontuadas se referem aos aspectos concretos e abstratos da arte da construção, relacionando a interação entre o material, o tipo de construção e a comunicação da lógica da estrutura escolhida, sendo esta relação fundamental para considerar uma orientação tectônica da prática projetual.

Para Oxman e Oxman (2014), a tectônica na arquitetura digital significa uma definição cultural das relações simbólicas entre material, estrutura e forma arquitetônica. O conceito de tectônica digital não é apenas uma adição de arquitetura digital ao termo tradicional de tectônica, mas constitui-se como um processo híbrido em que o contexto técnico é alterado por meio da combinação da interação entre material e construção, estrutura, e aspectos *performativos* da arquitetura. Para Leach⁹⁷ *et al.* (2004) ao considerar os termos “digital” e “tectônica”, pode-se chegar à conclusão de que eles estão se contradizendo, uma vez que o digital é abstrato e o termo “tectônica” remete ao concreto, ao tátil. No entanto, a oposição entre arquitetura digital e tectônica começa a se desfazer na medida em que os modelos digitais passam a se orientar pelos aspectos materiais, renovando o interesse na concepção estrutural e promovendo um novo espírito de colaboração entre arquitetura e engenharia.

Willian Mitchell⁹⁸ (1998), em seu ensaio *Antitectonics: The Poetics of Virtuality*, propõe uma abordagem que consiste em uma antítese do conceito de tectônica defendido por Frampton (1995), afirmando ser possível criar uma experiência espacial imersiva que seja totalmente separa da construção física. A simulação de condições físicas reais, assim como as propriedades dos materiais, o carregamento devido ao uso e as cargas de vento propiciam uma simulação de uma condição tectônica de projeção. A ênfase na interação processual é o que traz para a prática digital uma condição tectônica, em que de acordo com Andersson⁹⁹

⁹⁷ Neil Leach é arquiteto e teórico de arquitetura contemporânea, atualmente professor adjunto na Universidade do Sul da Califórnia e professor visitante na Universidade de Harvard, onde desenvolve pesquisas teórico-críticas focadas em materialidade e computação.

⁹⁸ Willian Mitchell graduou-se em Arquitetura pela Universidade de Melbourne e obteve o seu mestrado em Design Ambiental em Yale e em Artes em Cambridge. Foi reitor da escola de Arquitetura do MIT.

⁹⁹ Ida Kristina Andersson é arquiteta e professora do Departamento de Arquitetura da Universidade de Aalborg, na Dinamarca.

e Kirkegaard¹⁰⁰ (2006), nesta condição é onde o arquiteto se transforma em um *tekton* moderno, controlando tanto os aspectos tecnológicos quanto os aspectos estéticos do edifício.

Logo, o conceito de tectônica transposto para o meio digital enfatiza a orientação para o processo por meio de iterações e interações entre aspectos estéticos e técnicos como resposta ao contexto, à ciência e às forças conformadoras, possibilitando uma mediação entre forma, estrutura e propriedade dos materiais, o que faz com que a tectônica se torne novamente um conceito fundamental e operativo do processo de projeto. A retomada da orientação do processo de projeto para uma prática digital que envolve a *performance* material tornou as relações entre os elementos explícitas e mediadas, da concepção à construção, o que retoma a necessidade de uma maior compreensão do mundo físico, em que não somente a representação da forma, mas também os aspectos materiais e construtivos passaram a informar a síntese arquitetônica.

No entanto, as práticas digitais conservativas dos anos 1990 e 2000 buscaram, por meio de ferramentas paramétricas e ferramentas de simulação, a criação de efeitos visuais propiciados pela possibilidade de representação de formas complexas, produzindo formas em que a estrutura era ignorada ou que apresentava uma condição ornamental, representando a antítese de um processo tectônico, o que suscitou uma série de críticas. Para Leach *et al.* (2004, p.4, tradução nossa), do momento em que os computadores começam a ter um impacto significativo no campo da arquitetura, surgiu uma crítica que defendeu a tectônica e reivindicou que “aqueles que estavam produzindo somente imagens sedutoras falharam na compreensão da natureza intrínseca da produção arquitetônica”. Para Renzo Piano (1992 apud FRAMPTON, 1995, p. 383, tradução nossa), “um arquiteto deve ser um artesão, sendo que suas ferramentas podem ser um computador, um modelo experimental ou a matemática, mas ainda assim, ser um artesão”.

¹⁰⁰ Poul Henning Kirkegaard é engenheiro civil e estrutural, mestre e doutor pela Universidade de Aalborg, na Dinamarca. Atualmente é professor de Projeto de Estruturas Inovadoras no Departamento de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade de Aalborg, em que seus interesses de pesquisa são Estruturas Adaptativas, Morfogênese Computacional e Tectônica, concentrando-se em processos interdisciplinares entre Engenharia e Arquitetura.

Um exemplo mais conciso da prática formalista por meio de ferramentas digitais e do qual este representou inicialmente uma antítese da concepção tectônica, foi a crítica elaborada pelo crítico de arquitetura Hall Foster¹⁰¹ (2015), em que foi traçado um paralelo comparativo entre a proposta arquitetônica plasticista de Frank Gehry para construção do Museu Guggenheim de Bilbao no início dos anos 1990, e a proposta escultórica tectônica de Richard Serra, que embora apresente a mesma proposta estética explorando chapas de aço retorcidas, desenvolveu uma abordagem processual bastante distinta. O projeto arquitetônico do Museu Guggenheim de Bilbao explora os efeitos plásticos do material apenas com caráter decorativo e não se refletindo na experiência do espaço, se tratando de um envólucro escultórico para um cubo branco, como é determinado o espaço interior. Para Foster (2015), a exposição da obra do escultor Richard Serra no próprio museu torna evidente a fragilidade da proposta de Gehry, que pode ser reduzida a um fetichismo da forma, realizada por meio de um processo que não explora as possibilidades materiais e tectônicas.

Ao contrário do projeto arquitetônico de Gehry, a obra de Serra prioriza a relação entre carga e suporte, em que chapas de aço exploram o equilíbrio estrutural e o efeito de torção das peças dispostas em curvas e espirais, atingindo um efeito psicológico em seu percurso, sugerindo uma continuidade entre interior e exterior. O processo desenvolvido por Serra prioriza a exploração de materiais, as técnicas da engenharia e de fabricação da indústria para a concepção das obras, com uma linguagem estrutural evidente¹⁰². A obra de Serra também apresenta princípios escultóricos materiais, mas, ao contrário de Gehry, incorpora preceitos tectônicos, em que a escultura está imersa em seu suporte, que de acordo com Foster (2015), estabelece uma relação entre o material, o corpo e o contexto (FIG. 17).

¹⁰¹ Hall Foster é crítico de arte e historiador, formado pela Universidade de Princeton e Universidade de Columbia. Atualmente é professor de arte e arquitetura na Universidade de Princeton e escreve regularmente para as revistas *October*, *Artforum* e *The London Review of Books*. Sua abordagem se concentra no papel da vanguarda no pós-modernismo.

¹⁰² Richard Serra trabalhou em usinas de aço quando jovem, aplicando rebites e construindo treliças. De acordo com o relatado em entrevista (FOSTER, 2015, p. 253), Serra relata que “conhecia bem o processo industrial e sabia que podia utilizá-lo para fazer arte”. Serra ainda discorre que a introdução de processos industriais à sua obra é processual, relacionado aos procedimentos da indústria, e não imagético, relacionado a uma linguagem estética industrial.

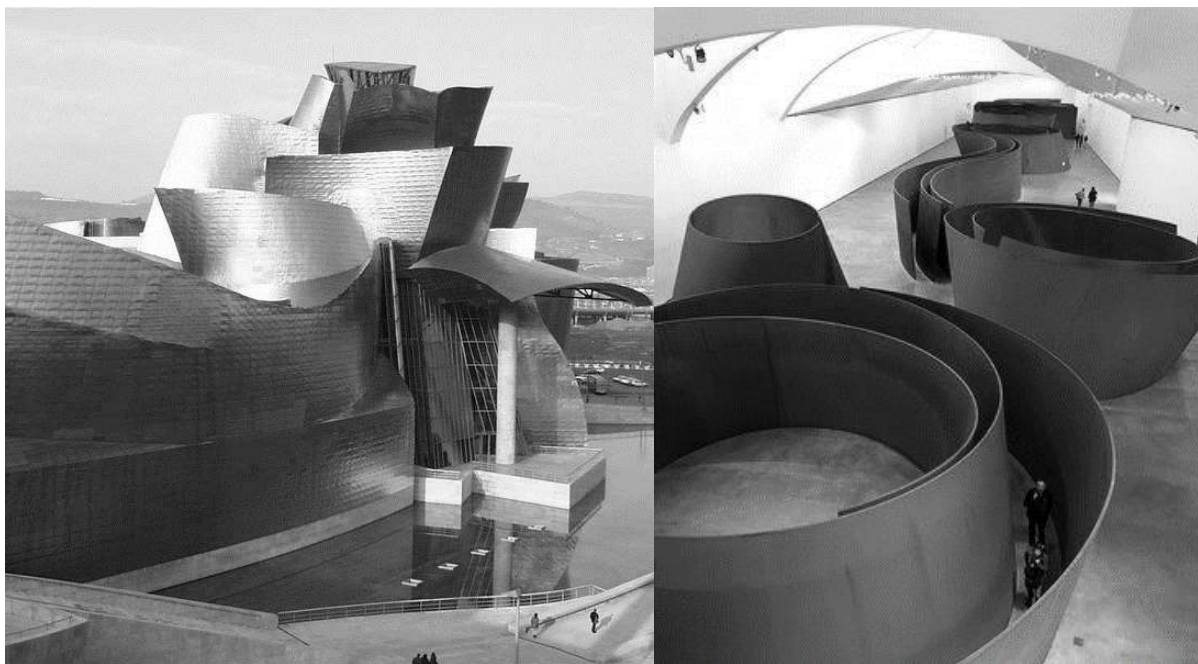


FIGURA 17 - Exterior do Museu Guggenheim de Bilbao (à esquerda) e esculturas de Richard Serra no interior (à direita).

Fonte: FOSTER, 2015.

O projeto de Gehry representa, conforme Picon (2010), a melhor ilustração das práticas ornamentais propiciadas pelas ferramentas digitais, em que a forma vem em primeiro lugar e não há quase nenhuma consideração com as restrições estruturais, o que traz uma crise tectônica para a prática da arquitetura, corroborando e acentuando um pensamento projetual atectônico e a geração de imagens da moda (FRAMPTON, 1995). Essas imagens da moda citadas incluem a orientação de projetos em que a estrutura é também ornamento e apresentam uma clara orientação para uma imagem estrutural complexa em detrimento das considerações construtivas, como vimos anteriormente. Essa distorção levou inclusive a um simulacro do conceito de tectônica conforme é colocado por Fritz Neumeyer¹⁰³ (*apud* Baumberger, 2012) em que “a arquitetura não precisa ser honesta em termos da construção, mas criar uma aparência de honestidade construtiva, a mágica necessária para se caracterizar como arte da tectônica”.

No entanto, a reflexão sobre esses processos atectônicos e a própria distorção do conceito de tectônica, levou a um desejo de resgatar na prática da arquitetura digital métodos de projeção e construção que privilegiam o processo e não a aparência, remontando, de

¹⁰³ Fritz Neumeyer é teórico de arquitetura, atualmente professor de Teoria da Arquitetura na Universidade Técnica de Berlim.

acordo com Picon (2010), a procedimentos que resgatam o espírito Gótico em contraposição a um pensamento estilístico Clássico¹⁰⁴. Os usos das máquinas digitais e da robótica para produção trouxeram a possibilidade de reinventar as práticas por meio de procedimentos que diferem dos princípios instaurados desde o séc. XIX, calcados na industrialização de massa. Para Oxman (2014), a síntese projetual orientada pela *performance* do material em que os processos computacionais englobam a integração entre estrutura, material e forma dentro da lógica das tecnologias de fabricação consistiu em procedimentos que trouxeram uma consideração simultânea da eficiência da forma, da economia de materiais e da facilidade de construção.

A pesquisa com montagem robótica significou um avanço tecnológico para a produção digital, propiciando respostas dinâmicas às condições ambientais, estabelecendo através da computação uma integração mais profunda de geração da forma e sua construção. Esses métodos ativaram uma reciprocidade entre a geometria, o material, a fabricação e a montagem como um princípio chave para a concepção do projeto (MENGES, 2015) e podem ser exemplificados pelo trabalho realizado pelo *Institute for Computational Design and Construction* (ICD) do *Institute of Building Structures and Structural Design* (ITKE) da Universidade de Stuttgart, cujos projetos experimentais desenvolvidos buscam focar na interação entre os conhecimentos de arquitetura, engenharia, planejamento e construção por meio da integração entre *performance* material (FIG. 18), fabricação digital e robótica (FIG. 19).

¹⁰⁴ Para Leach *et al.* (2004), a história da arquitetura é dividida entre duas formas de pensamento, a Gótica, em que a base primária é a compreensão da materialidade e da estrutura, e se centra no processo, e a Clássica, que se fundamenta em termos da composição visual, estando focada na representação.

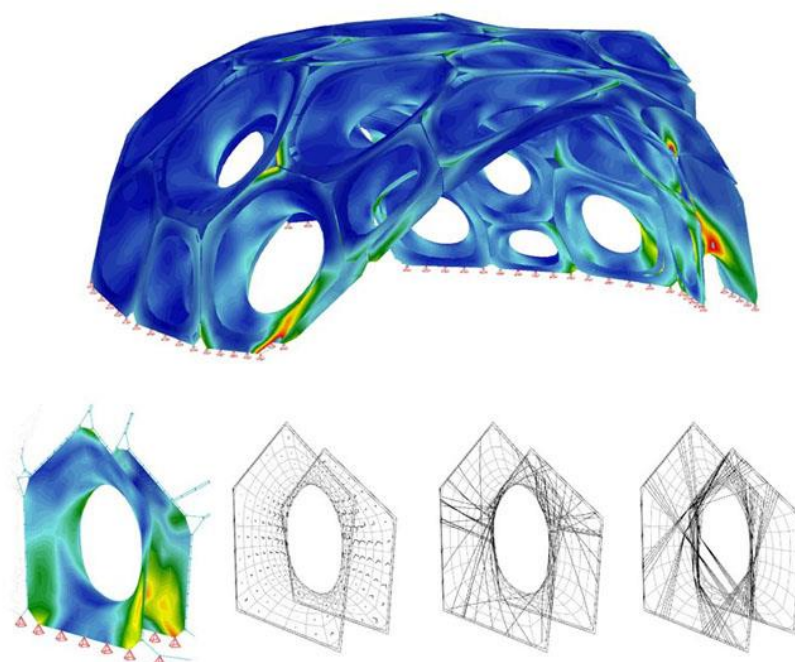


FIGURA 18 - Análise do fluxo de forças por MEF para a produção do pavilhão ICD/ITKE 2013-2014.

Fonte: MENGES, 2015.

A construção de formas arquitetônicas orgânicas geradas por meio de processos de otimização motivou uma intrínseca relação do projeto com a fabricação digital, o que suscitou abordagens orientadas para uma racionalidade de fabricação. Esta racionalidade de fabricação refere-se geralmente a processos que demandam a produção de componentes constituídos por formas topológicas não padronizadas, requerendo uma complexidade de fabricação e montagem somente possíveis através do uso de sistemas CAM. No entanto, a sofisticação dos processos de fabricação digital e construção robótica propiciaram que estes não fossem somente utilizados para a construção do detalhe e racionalização da geometria, mas também para o desenvolvimento de pesquisas orientadas para uma redefinição de todo o processo construtivo. No entanto, a orientação dos processos de projeto digitais somente para procedimentos que demandem uma produção por meio de fabricação digital ou robótica trazem uma limitação para a consideração da *performance* na prática de projeção, principalmente quando o contexto não favorece o uso destas tecnologias.

As possibilidades de produção de componentes por fabricação digital propiciaram que os projetistas trabalhassem próximos ao processo de produção industrial, substituindo a produção em massa pela customização industrial, favorecendo processos que Schumacher

(2017) denomina de “tectonismo”¹⁰⁵, transformando uma condição passiva de relação com a indústria para uma condição proativa de integração entre projeto, materialização e fabricação, eliminando etapas intermediárias de produção. No entanto, é necessário considerar que a adoção de métodos de produção de componentes e montagem robótica somente se conformam enquanto processos tectônicos em contextos específicos, não podendo ser considerados métodos construtivos “racionais” somente pela aplicação direta da técnica. Dessa maneira, para que as possibilidades de construção digitais se efetivem enquanto uma orientação tectônica para um determinado projeto, é necessário que haja uma adequação e uma reflexão acerca do contexto econômico e cultural, e do quão estas técnicas representarão processualmente uma escolha tectônica.

A racionalidade de construção, ao contrário da racionalidade de fabricação por meio de ferramentas digitais, não depende só do campo da arquitetura, mas do contexto de aplicação da tecnologia, modos de produção local e da relação entre agentes. Para Ferro (*apud* ARANTES, 2012), na arquitetura contemporânea as ferramentas digitais de projeto permitiram uma autonomia formal, em que o gesto artístico, antes irrealizável, tornou-se processo produtivo factível, porém, embora muitas das obras de capital simbólico tenham utilizado processos de fabricação digital no canteiro, isso não significou uma transformação na produção. Na maioria das obras o canteiro teve uma produção híbrida, com o trabalho artesanal de montagem atuando em conjunto com a fabricação digital de componentes. Em locais onde era possível obter a mão de obra mais barata, os processos se tornavam mais artesanais, mesmo com projetos de alta tecnologia. Sendo assim, a inovação tecnológica de projetos não foi acompanhada por uma inovação tecnológica no espaço da produção, mesmo em países centrais. O canteiro manteve a mesma lógica da manufatura e da extração da mais-valia da mão de obra. De acordo com Arantes (2012), a arquitetura na era digital-financeira ampliou enormemente o repertório de formas e técnicas à sua disposição, mas essa arquitetura foi reduzida a um mero significante, sem regras e limitações de qualquer espécie em busca de um grau máximo de renda.

¹⁰⁵ No original: Tectonism implies the stylistic heightening of engineering- and fabrication-based form-finding and optimization processes (SCHUMACHER, 2017). No texto, o autor defende o “tectonismo” enquanto um estilo subsidiário do “parametricismo”. No entanto, consideramos que o termo em si já é carregado de contradição, pois para Frampton (1995, p.2, tradução nossa) “a tectônica não favorece nenhum estilo em particular, que em conjunto com o lugar e a tipologia serve para conter a legitimação da arquitetura por outros discursos”

Sendo assim, na discussão da abordagem tectônica na cultura digital para a construção de procedimentos não conservativos é fundamental que os aspectos materiais e construtivos relacionados ao contexto de produção sejam fatores centrais no processo de formação. Nesse processo de projeto informado pelos aspectos tectônicos, um tema predominante passa a ser a necessidade reconstrução da relação entre arquiteto e engenheiro tendo em vista propiciar um acordo e um engajamento com as questões estruturais, materiais e construtivas desde a concepção do projeto até as relações no canteiro.

Para tanto, DeLanda¹⁰⁶ (2004) enfatiza que é necessário que esta relação seja revista na educação de ambos os profissionais, devendo estimular os estudantes de arquitetura com um aprimoramento na aprendizagem dos aspectos técnicos, e os estudantes de engenharia serem estimulados com os aspectos estéticos. Porém, DeLanda (2004) enfatiza que isso não significa aumentar as disciplinas técnicas na arquitetura, mas, como mencionado por Balmond (2013), requer a criação de uma “nova disciplina”, envolvendo uma abordagem radical do sistema educacional, tanto para as escolas de arquitetura, quanto para as de engenharia. Nesta abordagem, a tecnologia digital deve ser um meio facilitador dos processos dialógicos entre arquitetos e engenheiros, tendo as possibilidades digitais de hibridização mais bem exploradas, buscando como horizonte de projeção o desenvolvimento de relações dialéticas de conversa não somente para a produção de produtos, mas também para a construção de processos. Dessa forma, é com este argumento que iremos desenvolver o próximo capítulo, em que buscamos desenvolver uma metodologia de ensino por meio de disciplinas híbridas de projeto que procuraram estimular esta abordagem pretendida.

¹⁰⁶ Manuel Delanda é escritor, artista e filósofo mexicano radicado em Nova York. Professor da cátedra de Gilles Deleuze e filosofia contemporânea na Escola Europeia de Graduação e conferencista na Escola de Arquitetura de Princeton.

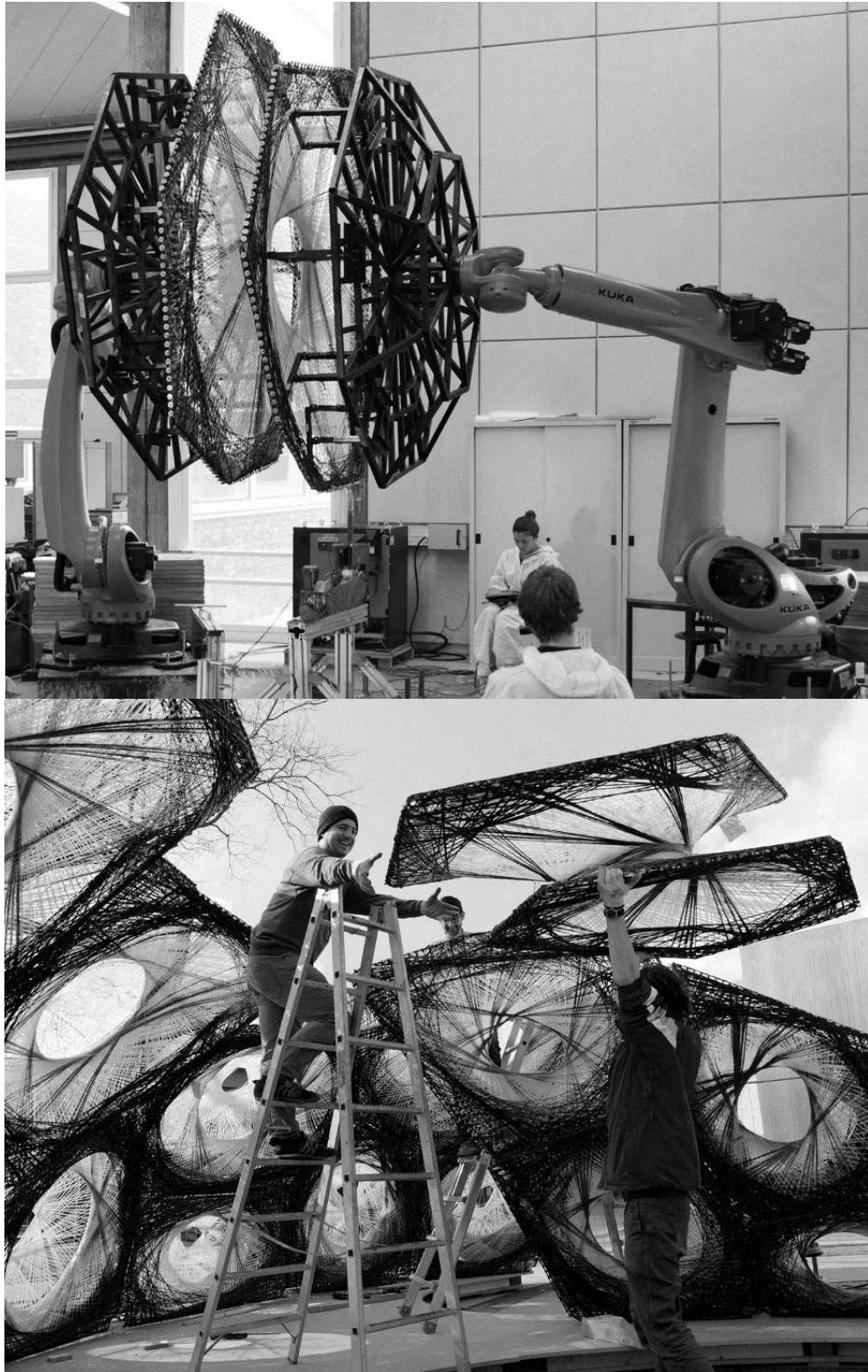


FIGURA 19 - Fabricação robótica dos componentes e montagem da estrutura do Pavilhão ICD/ITKE 2013-2014.
Fonte: MENGES, 2015.

3 COMO CONVERSAR

O ensino da projeção na arquitetura pode manter ou reconstruir os mecanismos de produção e reprodução do campo, assim como as relações de monólogo observadas nas relações cotidianas entre arquitetos e engenheiros. As orientações do ensino de projetos para práticas atectônicas mantêm tal relação apontada para a plasticidade da forma e a articulação do espaço, enquanto uma possível abordagem tectônica reconsidera as relações entre espacialidade, materialidade e construção. Sendo assim, a possibilidade de um ensino de projetos com uma orientação tectônica estimularia o diálogo com outros agentes pressupondo uma maior interação da arquitetura com os parâmetros da engenharia. Dessa maneira, o ensino de estruturas é fundamental para que os estudantes de arquitetura reflitam sobre as relações entre forma e materialidade, levando a uma interface entre as disciplinas de projeto e estruturas, cuja fragmentação só acentua a separação entre projeto e canteiro, já que tende a reproduzir as relações existentes no campo.

Os planos de ensino das disciplinas de estruturas ofertadas nos cursos de arquitetura enfatizam que o diálogo entre os profissionais é o que deve ser suscitado como o ponto de conexão entre a concepção da forma, do espaço e do projeto estrutural, a ser realizada pelo arquiteto na prática de projeção. Porém, a prática de ensino vigente propicia de fato o estabelecimento e a efetivação deste diálogo pretendido entre as disciplinas de projeto e estruturas? E, ainda, tendo em vista os mecanismos de produção e reprodução do campo da arquitetura, o que de fato se pretende com o estímulo a este diálogo e com quais objetivos?

O ensino de estruturas na arquitetura, na maior parte das escolas,¹⁰⁷ trabalha a aprendizagem disciplinar, centrada em métodos e conceitos tradicionais de ensino¹⁰⁸ originados nas escolas de engenharia civil, não tendo sido concebidos para satisfazer as necessidades específicas de uma orientação para a projeção arquitetônica, cuja prática requer uma complexidade de situações profissionais e sociais¹⁰⁹. Na maioria das vezes, são programas que apresentam não somente uma fragmentação dos programas originais oferecidos nas escolas de engenharia, mas também um raleamento do ensino, destinando ao estudante de arquitetura um percurso fraco e deficiente¹¹⁰ tanto nos requisitos técnicos quanto em outros objetivos. A lógica da progressão de disciplinas segue a ordem (FIG. 20): fundamentação teórica (conceitos de física e estática), conhecimento avançado (resistência dos materiais e análise estrutural), e conhecimento especializado (disciplinas com enfoque nas estruturas de concreto, aço e madeira); estando separadas do processo de projeto, não propiciam ao estudante de arquitetura compreender estruturas em um nível mais profundo, para além de somente adquirir habilidades relacionadas ao cálculo estrutural. O objetivo essencial do ensino de estruturas nos cursos de arquitetura deve ser promover a capacidade dos alunos de utilizarem a estrutura como parte da informação para o processo de síntese projetual, compreendendo seu comportamento global e permitindo que as definições estruturais sejam integradas à articulação do espaço.

¹⁰⁷ Tendo como referência os trabalhos apresentados no III Encontro Nacional de Ensino de Estruturas em Escolas de Arquitetura realizado na UFOP em junho de 2017.

¹⁰⁸ De acordo com Lopes *et al.* (2010) no paradigma tradicional ou moderno a epistemologia baseia-se na transmissão de conhecimentos em que se privilegia a explicação, pelos professores, da ciência normal disponível, ou seja, não há investimento na investigação. A aprendizagem é vista como aquisição mediante imitação/recepção, passividade, memorização e reprodução de modelos, cuja ênfase é posta nos conteúdos representados pelo que se supunha, *a priori*, que o aluno necessitava aprender para se formar e desempenhar as suas funções sociais.

¹⁰⁹ Esta complexidade é abarcada por um pensamento orientado para a construção de um paradigma pós-moderno na educação (LOPES *et al.*, 2010), sendo este incompatível com o princípio da racionalidade técnica. Nesse sentido, a epistemologia enfatiza menos o ensino formal e mais a aprendizagem, tendo como princípio o questionamento, a descoberta e a reflexão dos alunos, de modo a ajudá-los a construir o conhecimento “a partir de si próprios”, desenvolvendo-se numa direção de contínua investigação, assumindo uma natureza não apenas racional, objetiva e rígida, mas relacional, interpessoal, subjetiva, flexível e humanizada, na perspectiva de um compromisso com a transformação social.

¹¹⁰ Ver estudo completo no APÊNDICE B. O objetivo do estudo foi fazer uma análise comparativa entre o percurso de aprendizagem das disciplinas de estruturas nos cursos de Arquitetura e de Engenharia Civil da UFMG através da análise dos planos de ensino, tendo como finalidade verificar se o conteúdo ministrado está atendendo ao perfil desejado ao egresso do curso de Arquitetura. Para tanto, foram analisadas as diferenças entre o perfil dos egressos, o currículo de cada curso, a carga horária, as ementas, os objetivos e as referências bibliográficas de cada disciplina.



FIGURA 20 - Percurso de aprendizagem das disciplinas de estruturas nos cursos de Arquitetura (curso diurno versão curricular 2014/1) x Engenharia Civil (versão curricular 1998/1) da UFMG

Fonte: elaboração da autora

O ensino de estruturas nos cursos de arquitetura baseados estritamente em racionalidade técnica e na solução de problemas estruturais desarticulados do projeto não possibilita aos estudantes desenvolverem práticas especulativas e experimentais, o que não contempla o que Schön (1987) chama de zonas indeterminadas da prática. A relação entre arquitetos e engenheiros se situa exatamente nesta interação, gerando incertezas e conflitos de valores que escapam do alcance da racionalidade técnica. Nessas zonas indeterminadas está a possibilidade de descoberta a partir de exercícios de problematização, não havendo um procedimento claro para a seleção técnica de meios, o que demanda a construção de uma formulação para a resolução, que não se constitui como uma tarefa técnica, mas como uma tarefa reflexiva.

Dessa forma, a construção deste capítulo se baseia, na primeira parte, em uma análise reflexiva dos métodos mais tradicionais utilizados para o ensino de estruturas, buscando identificar as oportunidades que cada um deles trazem para uma reconstrução da relação entre arquitetura e engenharia, de maneira a abarcar a problematização estrutural reflexiva no ensino de projetos. A abordagem típica do ensino de estruturas para arquitetos tende a ser de dois tipos: ou por meio de métodos analíticos, predominantemente quantitativos, ou por métodos experimentais, predominantemente qualitativos. No entanto, uma terceira via também tem sido possível com a utilização de métodos computacionais, o que veremos mais detalhadamente adiante.

Na segunda parte, buscamos de maneira epistemológica a construção de um sistema de aprendizagem reflexivo entre o ensino de projetos e o ensino de estruturas incluindo o método computacional como linguagem comum, tendo como horizonte desenvolver procedimentos não conservativos orientados para uma prática tectônica por meio de conversa interdisciplinar. Para tanto propusemos uma abordagem sistêmica para observação e reflexão sobre os experimentos, estruturada a partir da referência teórico-conceitual de Schön e dos modelos cibernéticos de Pangaro baseados na Teoria da Conversação.

Na terceira parte, apresentamos os experimentos realizados na prática de ensino por meio de disciplinas híbridas de projetos e estruturas. O método de construção da observação dos

experimentos consistiu-se em um processo que buscou mostrar, de forma reflexiva, como o processo de experimentação na prática de ensino promoveu ações que propiciaram a identificação de elementos que possam orientar a reconstrução das relações entre arquitetos e engenheiros, tendo como horizonte a substituição das relações discursivas de monólogo por relações dialéticas de conversas.

PARTE I: MÉTODOS DE ENSINO DE ESTRUTURAS NOS CURSOS DE ARQUITETURA

3.1 Método Analítico

O método analítico é considerado o método tradicional de ensino de estruturas, estando voltado para procedimentos matemáticos em que são estabelecidas equações que governam o problema, baseadas em hipóteses simplificadoras. Essas equações são resolvidas de forma analítica manual, resultando em soluções numéricas exatas. A origem da adoção do método analítico matemático e da sua instrumentalização gráfica no mundo da construção ocorreu, de acordo com Santos *et al.* (2017), de maneira gradativa, tendo como marcos importantes: o desenvolvimento da teoria da resistência dos materiais realizada no séc. XVII por Galileo; o desenvolvimento do modelo de viga desenvolvido por Euler-Bernoulli; a fundação da análise estrutural moderna por Claude-Louis Navier (1785-1836)¹¹¹ propiciada por sua formulação da Teoria da Elasticidade; e o desenvolvimento da Teoria das Estruturas, ambos realizados no séc. XVIII. De acordo com Santos *et al.* (2017), as ilustrações do livro *Resumé des Leçons Données a l'École des Ponts et Chaussées sur l'application de la Mécahanique a l'Établissement des Constructions et des Machines* já podem ser consideradas como um código distintivo da engenharia de estruturas orientado para o projeto (FIG. 21).

¹¹¹ Claude-Louis Navier foi professor da *École Polytechnique* e da *École Nationale des Ponts et Chaussées* na primeira metade do séc. XIX.

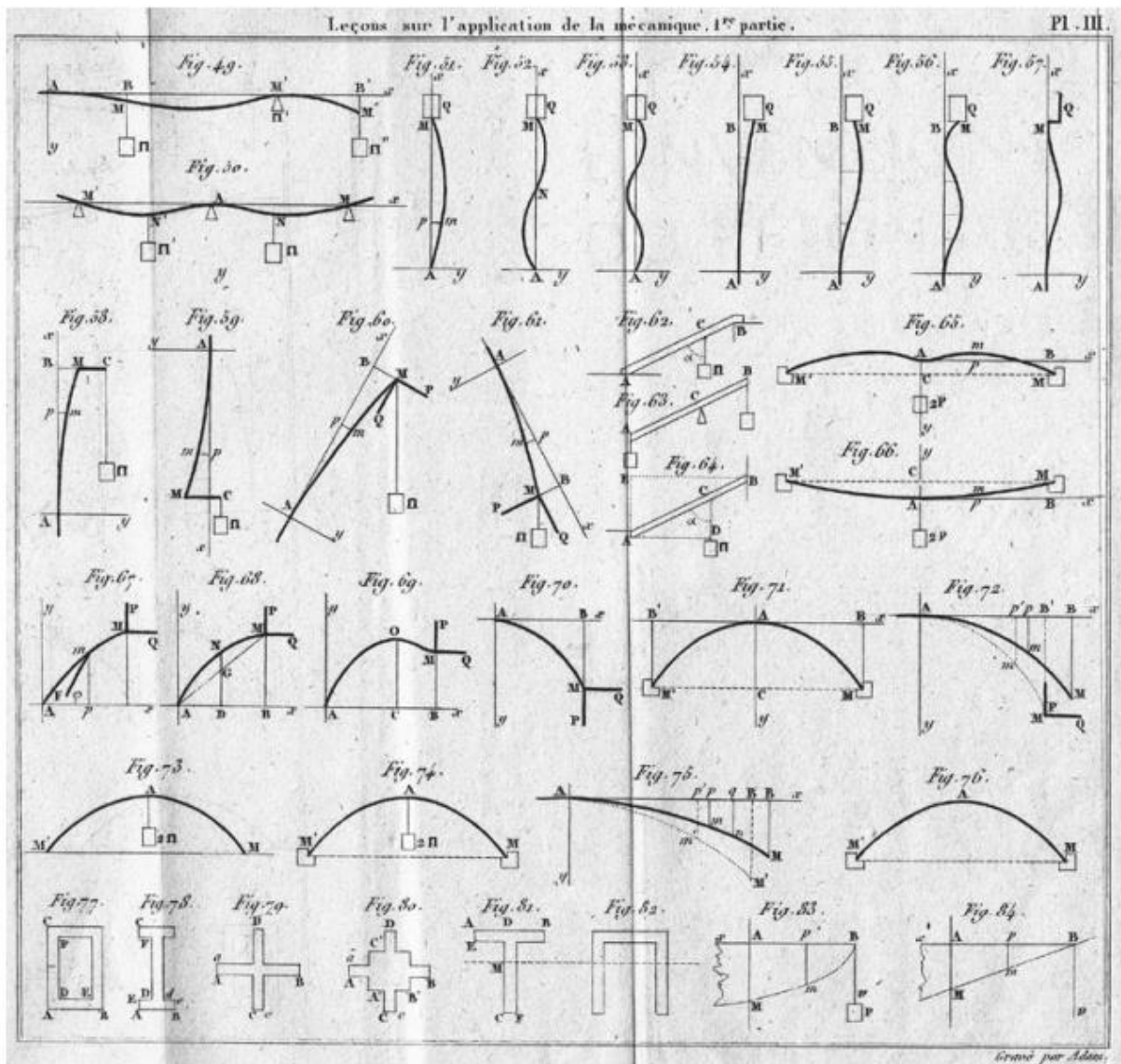


FIGURA 21 - Estudos de deformação para curvas elásticas realizados por Claude-Louis Navier, 1826
 Fonte: PICON, 2011.

A Teoria das Estruturas estabelece os principais requisitos para o desenvolvimento do projeto estrutural, cujo objetivo principal é garantir a segurança e desempenhar satisfatoriamente a função à qual se destina, não tendo deslocamentos superiores aos aceitáveis. Para tanto, a estrutura deve ser analisada por meio do método analítico, que consiste em um esquema estrutural gráfico, seguido pela definição de ações atuantes na estrutura, para que então possam ser calculados os esforços e deslocamentos, de tal maneira a propiciar o dimensionamento de elementos estruturais que resistam a estes esforços, sem que haja excesso de material empregado. Nesse modelo de concepção estrutural, os elementos estruturais (vigas e pilares) podem ser combinados em sistemas estruturais (viga-pilar, pórticos, treliças, arcos e cascas) de tal maneira que possa ser realizada sua representação

simplificada em termos de seus elementos, conexões e apoios. Essas estruturas devem ser submetidas às ações atuantes classificadas como permanentes (peso próprio e elementos permanentes) e variáveis (relacionadas ao uso, vento, cargas sísmicas e térmicas). Essas ações ocasionam esforços estruturais classificados como esforços normais, esforços cortantes, momento fletor e momento de torção, que resultam em deslocamentos. Os métodos para cálculo dos deslocamentos mais utilizados no ensino de estruturas são o Método das Forças, o Método dos Deslocamentos ou o Método de Cross. Empregando os princípios de resistência dos materiais, os resultados do cálculo dos esforços são utilizados para verificar a estabilidade do sistema estrutural e dimensionar as seções transversais dos elementos estruturais, de tal maneira que o material empregado seja capaz de resistir a estes esforços.

Os princípios pedagógicos para ensino e aprendizagem do método analítico consistem em uma sequência de aprendizagem ordenada pela aprendizagem de fundamentos básicos de geometria e mecânica dos sólidos; posteriormente seguida por conteúdos avançados que envolvem a análise estrutural e resistência dos materiais; e, após receberem esses fundamentos, desenvolvem-se habilidades de cálculos especializados aplicados aos materiais mais usuais na construção civil (concreto, aço e madeira). Espera-se que com esse conjunto de conteúdos sejam desenvolvidas competências para a validação de modelos estruturais, pré-dimensionamento, dimensionamento e detalhamento das estruturas, sem haver grandes distinções didáticas pedagógicas entre o ensino nos cursos de Arquitetura e Engenharia Civil.

Para Black¹¹² e Duff¹¹³ (1994) o método analítico consiste em um exercício estreito e com uso prático limitado, que sem a amplitude e profundidade de vários anos de rigorosos trabalhos como engenheiro de estruturas não é possível transferir este conhecimento para a aplicação na concepção estrutural no processo de síntese arquitetônica. As disciplinas ofertadas no curso de Arquitetura apresentam geralmente uma simplificação desarticulada do conteúdo quantitativo do percurso ministrado na Engenharia Civil, não tendo sido elaborada uma

¹¹² Gary Black é engenheiro e professor do curso de Arquitetura da Universidade de Berkeley. Atualmente é presidente da empresa *Integrated Structures, Inc.*, desenvolvendo processos integrados de projeto arquitetônico, engenharia estrutural e gerenciamento de construção.

¹¹³ Stephen Duff é professor na Universidade de Berkeley e professor associado na Universidade de Oregon. É mestre em Engenharia de Estruturas, Mecânica e Materiais. Seu interesse de pesquisa é o desenvolvimento de processos que integram estrutura e espaço na prática de projeção arquitetônica, estudando métodos e modelos educacionais para o ensino de estruturas.

proposta didático-pedagógica específica para o emprego do método analítico no processo de projeção arquitetônica.

De acordo com Black e Duff (1994), exigir que os alunos desenhem diagramas intermináveis de cisalhamento e momento, e resolvam repetitivamente problemas estáticos, faz pouco para prepará-los para o projeto. Nestas condições, os arquitetos formados com um treinamento pouco adequado para a concepção de sistemas estruturais, são forçados a transferirem para os engenheiros de estruturas a tarefa de conceberem definições estruturais elementares, que muitas vezes podem ser divergentes da solução arquitetônica intencionada. Dessa maneira, o ato de projetar estruturas nos cursos de arquitetura fica implicitamente ligado a um modo empírico de solução, utilizando abordagens baseadas em tentativas e erro, conhecimento acumulado e raciocínio dedutivo. Para tanto, espera-se que o aluno tenha desenvolvido ao final do percurso de aprendizagem a habilidade de intuir a adequação do modelo estrutural a ser utilizado por meio da intuição do comportamento estrutural e pela abstração das ações incidentes. No entanto, a repetição de exercícios clássicos desarticulados do projeto e a confiança de que os estudantes serão capazes de adequar os casos de projeto a esses modelos raramente se verifica de fato. Além disso, tais exercícios, de cunho estritamente técnico, não dão espaço à reflexão e experimentação, levando à dogmatização de soluções.

O método analítico enquanto única ferramenta de ensino de estruturas nos cursos de arquitetura não propicia aos estudantes de arquitetura desenvolverem habilidades para aplicação de cálculo estrutural na concepção de projetos. No entanto, seus resultados constituem uma unidade lógica que pode ser utilizada como referência para a análise e avaliação em procedimentos associados aos métodos experimentais e computacionais, possibilitando que os alunos percebam em escala o dimensionamento das estruturas, não devendo dessa maneira ser um método totalmente desconsiderado pelo ensino de estruturas na arquitetura.

3.2 Métodos Experimentais

Os currículos que instituem métodos experimentais para o ensino de estruturas são geralmente ancorados na construção de protótipos físicos em escala real ou reduzida, ou em práticas de canteiro experimental para a visualização do comportamento material e o exercício prático de técnicas construtivas, buscando desenvolver nos alunos uma compreensão do comportamento material por meio da prática ao invés de o fazerem por meio de processos matemáticos abstratos. A experimentação material está geralmente associada a procedimentos sistemáticos que implicam hipóteses previamente formuladas sob teste, por exemplo, na visualização do comportamento do concreto em ensaios de compressão ou flexão realizados em laboratório. No entanto, o termo também pode ser invocado em experimentos novos ou diferentes, nos quais os resultados não são previstos de antemão, buscando experimentar procedimentos que ligam a idealização realizada na prática de projeção à prática construtiva, possibilitando uma prática diretamente associada ao contexto.

A prática de prototipagem possibilita que as ideias abstratas ganhem um conteúdo formal e material, fazendo com que os alunos se concentrem em tarefas reais. Já as práticas em canteiros experimentais buscam proporcionar fundamentos práticos para a compreensão das propriedades dos materiais e das suas possibilidades de aplicação em sistemas construtivos. A crença do uso de métodos experimentais no ensino é que estes propiciem aos alunos, através da prática material e da investigação empírica, o desenvolvimento da capacidade de intuição estrutural, possibilitando que sejam realizadas avaliações qualitativas para posteriormente serem aplicadas como uma solução de projeto. Para Kapp¹¹⁴ *et al.* (2017), a intuição estrutural significaria que um arquiteto, diante de um projeto ou uma construção, teria imediatamente o conhecimento claro, distinto e adequado¹¹⁵ da estrutura, na sua totalidade e em cada elemento e relação. Dessa forma, o “sonho da intuição estrutural” significa para os

¹¹⁴ Silke Kapp é arquiteta, com mestrado e doutorado em Filosofia (UFMG, 1994 e 1999) e pós-doutorado na área de sociologia urbana (Bauhaus Universität Weimar/ Capes, 2015). Atualmente é professora associada da Escola de Arquitetura da UFMG e responsável pelo grupo de pesquisa MOM (Morar de Outras Maneiras).

¹¹⁵ O conhecimento claro e distinto consiste em uma representação do objeto na consciência por uma totalidade de elementos diferenciados entre si. E, quando essa diferenciação não ignora nenhum dos elementos do objeto, a representação chama-se *adequada*. O conhecimento claro, distinto e adequado não é dado aos humanos pela intuição. A intuição fornece apenas o conhecimento obscuro (das sensações) e o conhecimento claro confuso (das imagens, sem diferenciação de elementos) (KAPP *et al.*, 2017).

arquitetos a possibilidade de tomar decisões projetuais e construtivas sem as penúrias do cálculo analítico, que além de serem procedimentos morosos, implicam o risco da perda da compreensão da totalidade estrutural e até, paradoxalmente, da operação da construção. No entanto, para a filosofia não existe conhecimento intuitivo, uma vez que, de acordo com Kapp et al. (2017) intuições são sempre sensíveis e o conhecimento é sempre um processamento dessas intuições mediante raciocínios.

Dessa forma, o conceito de experimentação na prática do ensino de estruturas deve consistir em uma abordagem mais ampla do que somente a ilusão de desenvolver uma “intuição” do comportamento estrutural por meio da realização de modelos ou protótipos, mas deve buscar o desenvolvimento de processos que incluam o estímulo ao raciocínio e à crítica. Para Lawson (1997), os métodos experimentais, enquanto uma abordagem disciplinar calcada na reprodução de soluções estruturais típicas por meio de protótipos, não apresentam nenhuma inovação, fazendo com que os estudantes fiquem presos à montagem de um quebra-cabeça com as soluções apresentadas. Porém, os métodos experimentais quando atrelados a uma pedagogia do canteiro experimental podem consistir, de acordo com Arantes (2008), em um método de conscientização¹¹⁶, sendo um espaço de unidade entre o saber e o fazer, servindo não somente para a construção de formas arquitetônicas, mas fortalecendo a autonomia e as potencialidades transformadoras dos sujeitos, formando dessa maneira um novo tipo de arquiteto.

Buckminster Fuller foi um dos mais notáveis nomes da escola de artes Black Mountain College, que funcionou da metade dos anos 1930 até o final da década de 1950 no interior dos Estados Unidos, cujo objetivo era o desenvolvimento de métodos experimentais no ensino (DÍAZ, 2015). Embora tenha tido um período de vida curto, a escola influenciou a experimentação em várias áreas do conhecimento. O objetivo pedagógico da escola era “educar o estudante como uma pessoa e como um cidadão”. Para evitar tipos de reprodução social que favoreceriam a cultura dominante, as práticas pedagógicas experimentais desenvolvidas na Black Mountain College buscavam minimizar as bases de conhecimento

¹¹⁶ O método de conscientização ou método Paulo Freire foi elaborado pelo educador pernambucano Paulo Freire (1921-1992) em 1960 e fundamenta-se no diálogo entre educadores e educandos de forma ativa e estimulando a reflexão crítica.

preexistentes (alta cultura mascarada como tradição) e desdiferenciar¹¹⁷ setores especializados (entre disciplinas e entre peritos) do praticante leigo. Na visão de Josef Albers¹¹⁸, os efeitos da educação tradicional tendiam a limitar o potencial criativo com exercícios mecânicos que, por sua vez, produziam indivíduos com uma formação acrítica, preparados para realizar tarefas instrumentais.

A escola teve três modelos de experimentação aplicados ao ensino. O primeiro modelo proposto por Albers pressupunha um teste metódico da aparência e da construção da forma, no interesse de projetar novas experiências visuais, embora sempre contingentes. O segundo modelo, proposto pelo compositor John Cage¹¹⁹, propunha a organização de processos aleatórios (gerados ao acaso) e a aceitação anárquica da indeterminação. E o terceiro modelo, orientado para o “*design total*” proposto pelo arquiteto Buckminster Fuller,¹²⁰ estava centrado na “ciência de projeto abrangente e antecipada” por meio do teste das formas artísticas e arquitetônicas tradicionais. Apesar de suas diferentes propostas para a prática da arte experimental - das explorações da contingência aos esquemas do *design total* – os experimentos desenvolvidos por Fuller tentavam estabelecer uma experimentação em oposição à autoexpressão.

O modelo de experimentação proposto por Fuller buscava alavancar a criatividade do artista e a inovação tecnológica do cientista para repensar completamente atos e objetos de *design*. Para Fuller, os processos de projeção poderiam revelar verdades universais subjacentes, ocultas em padrões e redes, mas isto ocorreria apenas pela ênfase na constituição estrutural da forma, não na análise de sua aparência superficial. Fuller declarou sua oposição com relação à natureza das soluções lógicas dos programas de ensino de arquitetura baseado no

¹¹⁷ O termo “desdiferenciar” vem da biologia e se refere a um processo em que uma estrutura especializada volta a ter condições mais primitivas. Neste caso, a ação de desdiferenciar disciplinas e especialistas de leigos, busca horizontalizar e, assim, democratizar as relações em práticas experimentais de projeto.

¹¹⁸ Josef Albers (1888-1976) foi pintor, fotógrafo, tipógrafo, poeta e professor da Bauhaus (1925-1933), tendo emigrado para os Estados Unidos devido à repressão nazista, onde ingressa em 1933 na Black Mountain College e inicia um programa de formação em pintura. Após deixar a escola em 1950, ingressa como professor e diretor do Departamento de Design da Universidade de Yale.

¹¹⁹ já citado anteriormente no Capítulo 2.

¹²⁰ Richard Buckminster Fuller (1895-1983) foi *designer*, arquiteto, inventor e escritor. Fuller é considerado um visionário, tendo se dedicado ao desenvolvimento de propostas orientadas à eficiência e ao baixo custo das habitações e transporte. O destaque da sua obra foram as cúpulas geodésicas desenvolvidas na década de 1950, em que buscava soluções holísticas de *design* para soluções de problemas relacionados à qualidade de vida nas cidades por meio da tecnologia.

método *Beaux Arts*, uma vez que levavam os estudantes a tarefas superficiais de decoração ou à montagem de componentes preconcebidos. Nesse sentido, também, o fracasso tornou-se a característica essencial da pedagogia e do método experimental; fracassos representavam a liberdade de tropeçar no imprevisto. Para Díaz¹²¹ (2015), Fuller considerava o *ethos* da experimentação especulativa e seus riscos de fracasso, refletindo o processo de crescimento e transformação pessoal possível na própria educação e, até certo ponto, ajudando a perder preocupações sobre a determinação imediata do sucesso de um trabalho, em que todas as falhas experimentais produziram dados e revelaram as regras e padrões subjacentes ao teste.

Fuller afirmou sua ênfase na engenharia estrutural e na importância de pensar o projeto como um processo e ação, e não como um único objeto. A compreensão do estudante sobre as estruturas dinâmicas e a maneira como elas se relacionam com os problemas sociais poderia emergir somente através da experimentação heurística. Desencorajando o estudo da aparência visual da forma, em sua pedagogia Fuller enfatizou o benefício de conectar a forma à sua utilidade social. Esse modo de experimentação se consolidou com seus experimentos de pesquisa sobre as propriedades estruturais e os benefícios sociais da geodésica (FIG. 22). A cúpula geodésica, eventualmente prototipada para empregar *tensegrity*¹²², tornou-se uma pedra fundamental para a noção de planejamento holístico de Fuller, uma eficiente estrutura central para sua reconsideração de habitação, transporte e comunicações do pós-guerra como sistemas em rede. Sua abordagem enfatizava a correlação entre o arranjo formal e a estrutura subjacente, e dava grande valor à economia do trabalho e dos recursos, propondo por meio da investigação do material e da geometria estrutural encontrar as melhores formas que condicionam a produção e o “progresso cultural avançado”.

¹²¹ Eva Díaz é professora assistente de História da Arte do Pratt Institute. Em sua publicação *The experimenters: chance and design at Black Mountain College*, Díaz (2015) examina como um grupo interdisciplinar de artistas, principalmente Josef Albers, John Cage e Buckminster Fuller, propôs novos modelos de prática artística em torno do conceito de experimentação, e analisa os riscos e possibilidades de se utilizar o conceito de “teste” como uma lente para produzir, ensinar e compreender a arte.

¹²² O *tensegrity* é um princípio estrutural baseado no uso de componentes isolados em compressão dentro de uma rede de tensão contínua, de modo que os membros comprimidos (barras) não se toquem e os pré-esforçados e os membros tensionados (cabos) delineiem o sistema espacialmente.



FIGURA 22 - Experimentação com o domo geodésico
Fonte: DÍAZ, 2015.

Dessa maneira, os métodos experimentais desenvolvidos na Black Mountain podem ser entendidos concomitantemente como um teste da tradição e uma busca por resultados inovadores, tendo como os principais conceitos a colaboração, a interdisciplinaridade, a experimentação, a inovação, a liberdade, a contracultura e o pensamento político progressista. Sendo assim, considerando esta referência para o conceito de experimentação e o desenvolvimento de métodos experimentais para o ensino de estruturas, podemos vislumbrar a ampliação do método para uma compreensão holística do processo de projeção assim como pressupunha Fuller, não se constituindo apenas em exercícios práticos de prototipagem ou de prática em canteiro, mas constituindo-se metodologicamente como uma reorientação processual e conceitual.

3.3 Métodos Computacionais

Os processos computacionais apresentam uma saída para informar a síntese projetual em um processo de concepção estrutural, podendo promover por meio de *softwares* que simulam o comportamento material, o desenvolvimento de uma compreensão prática dos conceitos estruturais com uma aplicação imediata ao projeto arquitetônico. Os métodos computacionais propiciam a visualização e a interação dos estudantes de arquitetura com as informações da engenharia e sua aplicação em um projeto particular. As ferramentas computacionais permitem que o projetista trabalhe em estruturas indeterminadas, podendo controlar a relação entre a geometria, as forças incidentes e as propriedades dos materiais, algo difícil de ser realizado por meio dos métodos analíticos e experimentais. Estes métodos permitem que seja visualizada a deformação da estrutura, de tal maneira que a análise do comportamento estrutural seja percebido tanto globalmente como localmente, o que, para Black e Duff (1994), a possibilidade de explicitar a visualização destas informações por meio de “*zoom*” é fundamental para desenvolver um raciocínio estrutural em “solucionadores novatos”.

Os métodos computacionais ou métodos numéricos estabelecem equações que governam o problema, com base em determinadas hipóteses simplificadoras usualmente mais realistas do que as hipóteses simplificadoras adotadas nos métodos analíticos, e essas equações são resolvidas com o auxílio de um computador, de forma aproximada. O uso de linguagem

computacional para a análise estrutural está fundamentado em grande parte no Método dos Elementos Finitos (MEF), em que a representação da estrutura e sua visualização tendem a ser mais próximas da realidade material (FIG. 23). Na configuração do modelo, o usuário do *software* deve saber informar a geometria global da estrutura, suas condições de contorno, as ações externas incidentes, as propriedades do material e as seções transversais dos elementos estruturais, podendo o comportamento da estrutura, ou seja, seus deslocamentos e deformações, serem visualizados e avaliados de forma global ou local (FIG. 24).

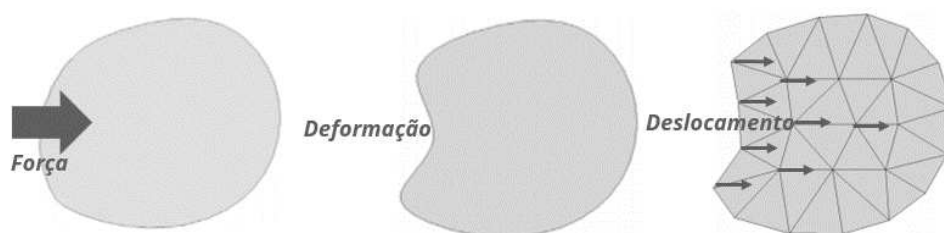


FIGURA 23 - Princípio formulador do MEF
Fonte: elaboração da autora

No ensino de engenharia, as ferramentas digitais de análise estrutural baseadas no MEF são utilizadas para acelerar a resolução de cálculos complexos ou aumentar a precisão analítica. No entanto, segundo Black e Duff (1994), o uso dessas ferramentas pode fornecer aos alunos um atalho direto para ganhar uma compreensão do comportamento estrutural sem anos de preparação. A própria atividade de montagem e configuração dos parâmetros do modelo propicia um entendimento global da estrutura, fazendo com que os alunos interpretem as conexões físicas da estrutura, bem como compreendam as suas relações elementares por meio de visualização tridimensional. Conceitos como mecânica dos sólidos, estabilidade, propriedade dos materiais, ações e normas de cálculo adquirem um significado imediato, estimulando os alunos a buscarem cada vez mais suporte teórico para a interpretação dos resultados.

Na prática de projeção arquitetônica que inclui *softwares* baseados no Método de Elementos Finitos como ferramenta de projeto, esse suporte teórico para que a análise informe o processo de síntese é o ponto crucial, em que a demanda do desenvolvimento de relações de conversa entre arquitetos e engenheiros se torna fundamental. A abordagem computacional do ensino de estruturas, quando levada para o ambiente de projetos, permite

que os estudantes de arquitetura se sintam confortáveis com o conteúdo, estimulando, assim como na abordagem construcionista de Papert (1980),¹²³ a raciocinarem matematicamente em sincronia com a estética, encorajando-os a conversar em uma linguagem própria da engenharia de estruturas, o que não ocorre no ensino tradicional. Essa aquisição de linguagem comum com a engenharia estimula processos de ensino interdisciplinares, potencializando a capacidade analítica e crítica dos participantes, fazendo com que sejam discutidas as sobreposições, as interfaces, as lacunas e os limites de cada disciplina. No entanto, de acordo com Black e Duff (1994), a ferramenta computacional é apenas um suporte, estando a compreensão dos parâmetros arquitetônicos no centro do processo.

¹²³ Seymour Papert (1928-2016) foi matemático, cientista da computação e educador, tendo passado maior parte da sua carreira como professor e pesquisador do MIT, onde propôs o desenvolvimento de métodos de “instrução auxiliada por computador”, em que as ferramentas computacionais serviriam como um apoio para os estudantes construírem o conhecimento. Para Papert, o pensamento computacional e a prática teoria *construcionista* de aprendizagem poderiam levar os estudantes a uma autonomia de pensamento (PAPERT; HAREL, 1991). Para experimentar a sua teoria, Papert (1993) realizou experimentos como o “Talking Turtle” em que introduziu linguagem gráfica de programação computacional para crianças, estimulando-as a desenvolverem melhor a capacidade de raciocinar acerca dos conceitos de geometria, bem como de estética, e as encorajando a conversar matematicamente, o que não ocorre no ensino tradicional. Para Papert (1980), a programação auxiliaria as crianças a compreenderem os conceitos abstratos da matemática de uma maneira mais direta do que as outras abordagens, estimulando as crianças a criarem, adaptarem e explorarem, além de incitar um aprendizado sobre a aprendizagem. A teoria *construcionista* de Papert (1980) é baseada na abordagem construtivista de Piaget, em que o ato de aprender deve ser baseado na experiência. A abordagem *construcionista* é uma teoria sobre o conhecimento e ao mesmo tempo uma estratégia de aprendizagem que abarca a ideia de uma construção mental, reconhecendo que a melhor forma de desenvolver modelos mentais é através da construção de modelos reais compartilhados. Esta construção deve estar contextualizada, devendo ter vínculo com a realidade de quem está construindo ou com o local em que será produzido e utilizado. A diferença da abordagem *construcionista* para a construtivista é que o construtivismo procura destacar os interesses e habilidades para atingir metas educacionais, enquanto o *construcionismo* centra-se na forma de aprendizagem, estando condicionada ao contexto e às diferenças individuais. Papert e Harel (1991) enfatizaram que o *construcionismo* abarca a faceta lúdica e a provocação, propiciando processos de autorrecursão na aprendizagem. Tanto para a abordagem construtivista quanto para a abordagem *construcionista*, a definição de inteligência cognitiva está centrada na capacidade de adaptação, já que existe uma fragilidade do pensamento durante os processos de mudança, demandando dos indivíduos uma superação das suas visões de mundo, e uma necessidade de construção de entendimentos mais profundos sobre si mesmos e sobre o ambiente. O *construcionismo* apresenta uma ideia transacional de que a interface computacional pode ser uma transição entre o corpo e as ideias matematicamente abstratas.

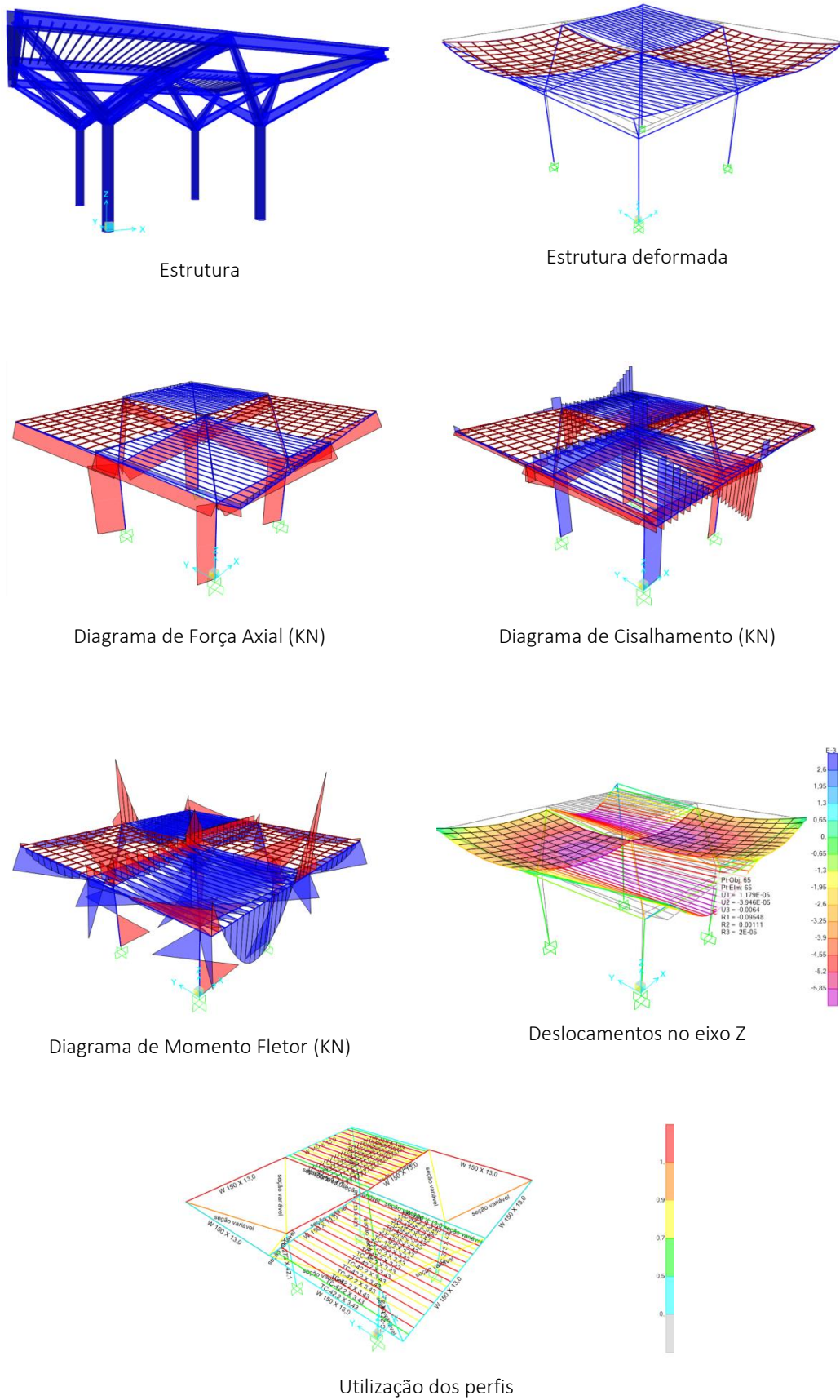


FIGURA 24 - Exemplo de concepção e visualização do comportamento estrutural no *software* SAP2000
 Fonte: elaboração da autora

A expectativa de se promover a conversa entre engenheiros e arquitetos no ensino equivale a promover nos estudantes o senso de equilíbrio entre as possibilidades de descoberta da estrutura em consonância com o manuseio do espaço, desenvolvendo assim relações dialéticas entre os profissionais. Dessa maneira, a modelagem paramétrica de um modelo de análise pelo MEF tem o potencial de facilitar o processo dialógico entre os parâmetros arquitetônicos e os parâmetros da engenharia de estruturas, possibilitando que o projetista desenvolva um processo circular e recursivo de interação com o modelo, constituindo-se como uma ferramenta potente de conversa entre homem e máquina para o ensino de estruturas na arquitetura.

Dessa maneira, como forma de elucidar o potencial do método computacional no ensino de arquitetura, relataremos as experiências da Universidade de Berkeley, da Universidade de Harvard-MIT e da Universidade de Zurich¹²⁴ como propostas que demonstram o potencial da conversa interdisciplinar e dos modelos de hibridização aplicados ao ensino de projeção por meio do uso do método computacional. Estas experiências têm em comum a participação de arquitetos e engenheiros no ambiente de ensino de projetos, a utilização de ferramentas digitais de análise estrutural como linguagem comum, e a reflexão que estes processos suscitam para a prática da projeção e sua abordagem teórica. O que se notou nos experimentos relatados é que os processos desenvolvidos baseados em informações compartilhadas por meio de ferramentas computacionais de visualização e produção ofereceram a possibilidade de expandir a prática de projeção para uma experimentação quase material, e em alguns casos, tectônica. Dessa maneira, veremos a seguir essas experiências de maneira mais detalhada, buscando, por meio desses relatos, identificar o potencial e os riscos relacionados ao uso de métodos computacionais no ensino de estruturas na arquitetura, e de que forma essas experiências puderam auxiliar na construção da nossa própria experiência metodológica desenvolvida nesta tese.

¹²⁴ Além desses experimentos de hibridização no contexto do ensino de projetos na arquitetura, também podemos citar a abordagem atual da *École Nationale des Ponts et Chaussées* que a faz de uma forma integrada e flexível tanto nos currículos de engenharia como de arquitetura, possibilitando titulações duplas, tanto para a formação de arquitetos-engenheiros quanto de engenheiros-arquitetos. O currículo da *Ponts* busca uma formação crítica, desenvolvendo projetos desde o primeiro ano de formação visando à resolução de problemas reais, tendo estes não somente uma abordagem instrumental, mas uma orientação para uma abordagem das ciências humanas e sociais.

3.3.1 Universidade de Berkeley

A experiência de seis anos com a oferta da disciplina “Análise de Computação e Projeto de Estruturas”, realizada pelos professores Gary Black e Stephen Duff no início dos anos 1980 no Departamento de Arquitetura da Universidade de Berkeley, constituiu-se como base para a organização de um novo currículo para o ensino de estruturas da referida universidade. A proposta da disciplina era experimentar o uso de *software* de Elementos Finitos¹²⁵ para que os alunos pudessem aprender sobre o comportamento de estruturas indeterminadas e realizarem análises estruturais de estruturas muito simples até a análise completa de um edifício de pequeno porte. A principal consideração para este experimento consistiu na inversão da relação entre aulas teóricas e de laboratórios, considerando que o material teórico nunca deveria ser ensinado como um fim em si mesmo, devendo ter como objetivo apoiar e alimentar as atividades no laboratório.

Na primeira fase da disciplina, para criar familiaridade com a ferramenta digital, os alunos deveriam apenas visualizar o comportamento de estruturas simples, previamente configuradas pelos professores. Após visualizarem a estrutura deformada, os alunos deveriam projetar a sua condição de contorno.¹²⁶ A segunda fase da disciplina consistia na formulação de um modelo estrutural pelos alunos manualmente, em que deveriam conferir o equilíbrio e prever o deslocamento da estrutura de maneira intuitiva e por meio de métodos de cálculo analítico, e, posteriormente, deveriam verificar no *software* se a análise manual era convergente com a análise computacional. Posteriormente, os alunos eram convidados a interagir com o modelo computacional, modificando as propriedades dos elementos estruturais tais como seção transversal, módulo de elasticidade do material, comprimento dos vãos e demais aspectos da geometria da estrutura, tendo como objetivo manter o equilíbrio das reações de apoio. E, por fim, como proposta de trabalho final da disciplina, os alunos analisariam a estrutura de um pequeno edifício previamente projetado, devendo ser examinado o comportamento global e de todos os elementos da estrutura, e ser preparado um relatório detalhado contemplando as verificações de tensões e os deslocamentos, tudo de

¹²⁵ O *software* utilizado foi o programa de análise estrutural *SAP90*.

¹²⁶ A condição de contorno é um termo da engenharia de estruturas que significa a definição da condição em que o sistema estrutural irá conduzir as ações incidentes na estrutura aos seus respectivos pontos de apoio.

acordo com as normas de construção. Black e Duff (1994) consideram que esse processo de ensino promoveu um desenvolvimento genuíno da sensibilização estrutural nos alunos, possibilitando que os estudantes de arquitetura se sentissem confiantes tanto com relação à compreensão dos conceitos teóricos quanto com relação à sua aplicação prática.

Após a primeira experiência, os professores propuseram que a disciplina se estendesse em uma segunda fase, em que os alunos deveriam desenvolver um projeto integrando aspectos estruturais e espaciais. Nesse processo de síntese arquitetônica integrada com ferramenta computacional de análise estrutural, Black e Duff (1994) relatam que muitas das ideias formais iniciais propostas pelos alunos se mostravam estruturalmente inviáveis. Esta primeira análise estimulava os alunos a construir protótipos físicos para ajudar a compreender os aspectos de equilíbrio estático estrutural em consonância com a articulação do espaço. Essa atividade promoveu nos alunos um desejo de revisar os conceitos apreendidos em disciplinas teóricas de estruturas, compreendendo que essas teorias poderiam melhor informar sua síntese projetual arquitetônica.

Para Black e Duff (1994), após os anos de experimentação, em um processo de reflexão sobre a experiência, alguns conceitos foram considerados essenciais para servir como base e fundamentação de modelo para disciplinas isoladas e para a estrutura do novo currículo, que foi estendido para além da graduação, possibilitando também a participação de alunos de mestrado e doutorado. Dentre eles, como princípios fundamentais, considerou-se imprescindível que o ensino de estruturas fosse realizado no contexto de projeto arquitetônico, com um escopo adaptado às necessidades específicas dos arquitetos, em que arquitetura, estrutura e contexto cultural fossem tratados simultaneamente. Dessa maneira, a concepção de espaço e estrutura deveria estar integrada, convergindo para uma percepção tectônica do projeto arquitetônico.

O currículo implementado consistiu em duas disciplinas introdutórias (*Introdução às Estruturas e Análise de Computação e Projeto Estrutural*) e cinco disciplinas avançadas (*Estrutura, espaço e construção em grandes edifícios históricos; Processo de Projeto Integrado; Estrutura e Espaço; Estruturas e Construção: a arte de fazer; e Estúdio de Projeto Estrutural*). As disciplinas introdutórias procuram apresentar conceitos básicos de equilíbrio,

estática, mecânica e construção, e familiarizar os estudantes com a ferramenta computacional por meio de análise estrutural bidimensional. Já as disciplinas avançadas tiveram uma abordagem diretamente relacionada com a integração entre estrutura e espaço, trabalhando temas como a análise estrutural de edifícios históricos e realizando discussões acerca de uma abordagem teórica para processos de projeção que integram aspectos da arquitetura, engenharia e construção em um único procedimento. Além disso, as disciplinas se propuseram a realizar uma reflexão crítica sobre quais seriam os problemas teóricos e práticos decorrentes da implementação de um processo integrado de engenharia e projeto arquitetônico na prática profissional. Essa reflexão resultou em uma disciplina optativa para discutir aspectos metodológicos e realizar estudos práticos experimentais.

Um aspecto interessante relatado por Black e Duff (1994) foram os “fortes laços” criados entre o Departamento de Arquitetura e o Departamento de Engenharia Civil, tendo sido criados programas paralelos de graduação recíproca, permitindo que os estudantes de arquitetura obtivessem um diploma menor de engenharia estrutural, e os estudantes de engenharia obtivessem um diploma menor em arquitetura. Também foi criado um mestrado duplo, em que os alunos de pós-graduação poderiam prosseguir simultaneamente em um mestrado em Arquitetura e um mestrado em Engenharia Estrutural, Mecânica e Materiais. A demanda dessa integração veio em parte pelo interesse dos próprios alunos, tanto de engenharia, que procuraram o Departamento de Arquitetura com interesse em compreender melhor a aplicação da engenharia de estruturas no processo de projeto arquitetônico, quanto dos estudantes de arquitetura, que desejavam compreender aspectos teóricos de engenharia de estruturas mais avançados.

A experiência do Departamento de Arquitetura da Universidade de Berkeley nos anos 1980 antecipou no ensino uma prática profissional dialógica entre arquitetura e engenharia por meio do uso de ferramentas digitais. À época, a interface de visualização do *software* ainda não apresentava a sofisticação dos recursos gráficos atuais (FIG. 25). Os *softwares* atuais, além de mostrarem diagramas em cores, possibilitam a modelagem paramétrica, ampliando ainda mais as possibilidades de interação com as questões arquitetônicas, e potencializando o uso desta ferramenta para o ensino.

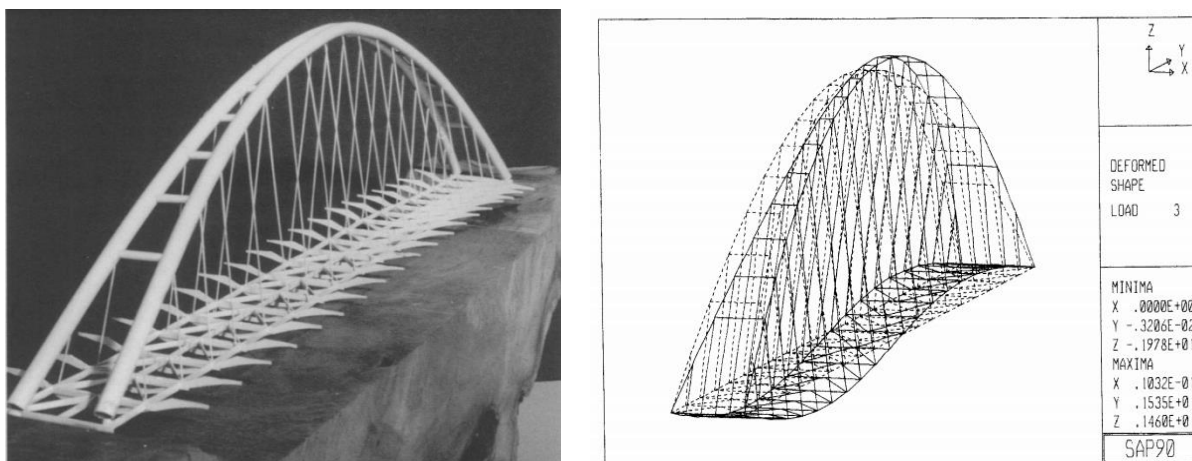


FIGURA 25 - Exemplo de projeto de estudante para ponte (1990) – protótipo físico (à esquerda) e análise estrutural no SAP90 (à direita)

Fonte: BLACK E DUFF, 1994.

Mas, o aspecto mais interessante deste experimento é que houve uma preocupação reflexiva em realizar conjuntamente uma abordagem teórica da prática de ensino que estava sendo instaurada e das implicações que esta orientação poderia ocasionar tanto no campo da arquitetura, como também da engenharia. Este experimento, de acordo com Black e Duff (1994), serviu como modelo para a mudança de currículo de outros cursos de arquitetura, e, além disso, por meio da formação híbrida de profissionais de engenharia e arquitetura, acabaram gerando um impacto indireto na prática profissional.

3.3.2 Universidade de Harvard-MIT

Hanif Kara, que já mencionamos anteriormente, engenheiro de estruturas e professor do Departamento de Arquitetura Universidade de Harvard, juntamente com o arquiteto e professor Andreas Georgoulis,¹²⁷ realizaram um experimento de ensino de projetos entre 2006 e 2010 envolvendo professores e alunos de pós-graduação em arquitetura de Harvard, e alunos de pós-graduação em engenharia estrutural e computação do MIT. O experimento denominado *In search of Design through Engineers* é relatado no livro *Interdisciplinary Design: New Lessons from Architecture and Engineering* publicado em 2012, e consistiu em criar exercícios em que a prática de projeto era um meio para a aprendizagem interdisciplinar.

¹²⁷ Andreas Georgoulis tem formação interdisciplinar em “Architecture Engineering” pela Universidade Técnica Nacional de Atenas, e mestrado e doutorado pela Escola de Design de Harvard (GSD). Atualmente é professor e diretor de pesquisa do Zofnass Program for Sustainable Infrastructure na GSD, e seu foco de pesquisa é a dinâmica da prática de projeção entre pessoas, tecnologia e sistemas de organização.

Segundo Kara (2012), o objetivo do experimento foi fornecer um conjunto de pontos de vista para investigar a relação entre arquitetura e engenharia, e a própria natureza da prática de projeção. Os projetos e a metodologia usados nas discussões buscavam criar um contexto compartilhado para provocar o pensamento sobre a prática de projeto, e, através da comunicação entre fronteiras disciplinares no ensino, prática e construção, potencializar a descoberta de novos significados.

O início do curso consistia de tarefas mais descritivas, mais gerais e mais processuais, provocando os estudantes a refletirem sobre a relação fenomenológica da escolha dos materiais e o conflito com as questões pragmáticas, que, no caso, seria por exemplo justificar um possível aumento de custo em decorrência de uma determinada escolha de material. Essas tarefas segundo Georgoulas (2012), levavam a análises fracas e resultados de projeto pouco satisfatórios. Dessa maneira, os professores decidiram mudar a orientação das tarefas, sendo mais objetivos com relação à proposta que consistia em, por exemplo, solicitar a remoção de dois pilares de um projeto arquitetônico conhecido e refletir sobre as implicações que sua remoção poderiam causar no espaço. Outro exercício proposto consistia em reprojetar determinado edifício icônico em outro contexto, refletindo acerca de suas questões tectônicas. E, por fim, um terceiro exercício consistia em duplicar a área do programa de algum edifício simbolicamente icônico, lidando com as implicações estruturais que isso causaria.

Para Georgoulas (2012), esses exercícios forçavam os estudantes de arquitetura e engenharia a tomarem decisões de forma conjunta, exercitando uma prática de interação e cooperação. Nesse processo, as semelhanças, os conflitos e as sobreposições disciplinares foram explicitados. Arquitetos iniciavam o processo com argumentos espaciais e formais, enquanto os engenheiros utilizavam análises puramente quantitativas para justificar seu ponto de vista. Os arquitetos representavam suas ideias por meio de imagens fotorrealísticas, enquanto os engenheiros demonstravam seus argumentos por meio de diagramas de deformação gerados em *software* de análise estrutural. Essa dinâmica também foi ineficiente, uma vez que, segundo Georgoulas (2012), na apresentação dos trabalhos ficava evidente a divisão disciplinar do trabalho entre arquitetos e engenheiros, em que cada um apresentava sua

parte, demonstrando que não havia sido desenvolvida uma abordagem unificada e coesa do problema.

Em busca de propiciar um ambiente verdadeiramente cooperativo, os professores propuseram uma inversão de papéis, em que os engenheiros deveriam tratar das implicações espaciais e os arquitetos deveriam realizar as análises estruturais computacionais. Essa nova configuração fez com que os alunos realmente articulassem as soluções em conjunto. Nessa experiência, o uso da tecnologia digital de projeção foi fundamental. Os alunos utilizaram *softwares* paramétricos e de análise estrutural para especular acerca das oportunidades e criar soluções alternativas. Os parâmetros norteadores do projeto foram identificados de modo a informar o modelo, acrescentando a participação do engenheiro como um agente ativo para a articulação de soluções. Nesse processo, os estudantes puderam perceber o impacto da rearticulação do sistema estrutural ou em como a mudança na especificação dos materiais pode provocar novos sentidos e novas oportunidades de uso do espaço (FIG. 26).

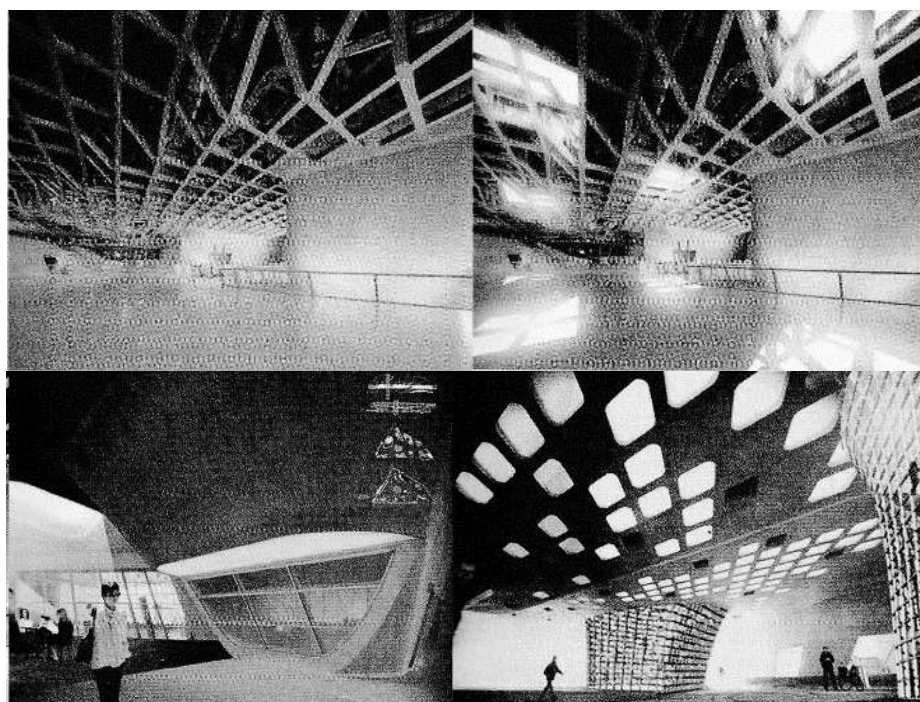


FIGURA 26 - Exercícios projetuais de reconfiguração do sistema estrutural para o projeto Phaeno Center
Fonte: GEORGOULIAS, 2012.

Georgoulias (2012) relata que ao longo dos experimentos surgiu um interesse mútuo entre estudantes de arquitetura e estudantes de engenharia, emergindo uma relação de

cooperação genuína. A busca na cooperação emergiu e convergiu para a busca por um acordo, procurando compreender o que havia de comum entre os pontos de vista de arquitetos e engenheiros, mas que devido à especialização de cada um, levaram a interpretações diferentes. Uma das principais reflexões acerca deste experimento foi pensar em como cada disciplina abordou os problemas de projeto, repensando os percursos de formação. Dessa maneira, a partir desse exercício de reflexão, Georgoulas (2012) apontou que alguns questionamentos surgiram com relação ao contexto de integração das disciplinas, considerando se seria mais adequado ocorrer num ambiente físico, virtual ou em uma condição híbrida, e ainda, se este ambiente de ensino compartilhado seria capaz de criar uma nova cultura.

3.3.3 Universidade de Zurich

A experiência realizada na Universidade de Zurich de Ciências Aplicadas em Winterthur (ZHAW), no Center of Constructive Design (ZKE), traz uma perspectiva da colaboração interdisciplinar não somente como um experimento, mas como uma convicção de que a concepção estrutural pode ser usada como um gerador central do projeto. Para Christoph Wieser¹²⁸ (2012), isso requereu desenvolver um currículo que estimulasse uma compreensão simultânea dos parâmetros espaciais e arquitetônicos conjuntamente com a compreensão dos aspectos técnicos e estruturais do edifício, buscando que essa resulte em uma compreensão cultural e material da prática de projeção.

Para tanto, o currículo vigente apresenta três disciplinas práticas em que de maneira híbrida são avaliados os aspectos arquitetônicos e estruturais. No primeiro ano é ofertada a disciplina *Basic Structural Design* em que aproximadamente 70% dos alunos são de arquitetura e 30% de engenharia de estruturas e metade dos professores são engenheiros e metade arquitetos. O foco da disciplina está na relação entre estrutura e espaço. As aulas teóricas são ofertadas por professores de ambas as disciplinas e os estudantes trabalham em grupos mistos desenvolvendo exercícios com enfoque na análise estrutural e no projeto arquitetônico.

¹²⁸ Christoph Wieser é diretor do *Center for Constructive Design* (ZKE) na Escola de Arquitetura, Design e Engenharia Civil da *Zurich University of Applied Sciences in Winterthur* (ZHAW).

No terceiro ano, é oferecida a disciplina *Structural Research* em que os estudantes são estimulados a relacionar a interdependência do material, da estrutura e da expressão da forma arquitetônica. Essas relações são criticamente analisadas com a intenção de explorar o potencial inovativo dos métodos de construção e novos usos para os materiais. Nesses exercícios analíticos, os alunos adquirem a habilidade de descrever a estrutura e articular a concepção estrutural com a proposta espacial. Essa disciplina é ofertada no contexto da pós-graduação e procura estimular uma mediação entre pesquisa e ensino. O foco de ensino varia, sendo em um semestre voltada para questões de estabilidade estrutural e em outro para questões específicas dos materiais.

E por fim, no quarto ano, ao final do *master*, é ofertada a disciplina *Structural Project* em que os estudantes adquirem fundamentos e habilidades para desenvolver e implementar conceitos arquitetônicos e estruturais complexos. Nesse exercício de projeto é atribuído ao projeto estrutural uma posição central, com suas implicações técnicas, materiais, espaciais e estéticas. Os estudantes são estimulados a desenvolver propostas não convencionais em diferentes escalas, não sendo uma disciplina de treinamento para a prática profissional, mas uma incitação para abordar o processo de projeto como um processo de pesquisa.

O modelo curricular do curso do ZKE demonstra uma integração interdisciplinar consolidada entre arquitetura e engenharia, podendo ser utilizado nesse percurso de ensino uma combinação de métodos dependendo dos objetivos de cada uma das disciplinas. Nesses processos podem ser utilizados métodos computacionais, experimentais e analíticos em suas mais diversas combinações, sendo explorados com maior ou menor intensidade, dependendo do contexto e do tipo de prática de projeção a ser exercitada. Wieser (2012) enfatiza que esse conceito educacional não busca reproduzir as relações de colaboração entre arquitetos e engenheiros que ocorrem no mundo do trabalho, mas busca uma reflexão acerca dessas relações e ambiciona criar as bases para um novo modelo de trabalho não conservativo, permitindo a busca conjunta de soluções, inclusive processualmente, na seleção dos métodos.

PARTE II: CONVERSAÇÃO COMO MÉTODO DE OBSERVAÇÃO, REFLEXÃO E APRENDIZAGEM

Conforme vimos anteriormente, a construção e a efetivação de relações de conversa entre arquitetura e engenharia no ensino de projetos envolvem uma experimentação prática e reflexiva, exigindo um exercício constante de circularidade e recursividade para o aprimoramento das disciplinas propostas, de tal maneira que se constituam em uma reconstrução do modelo vigente, orientadas para a construção de práticas não conservativas. Assim, o que realizamos ao longo de três anos de pesquisa (entre 2016 e 2018) foi a efetivação de experimentos de hibridização entre ensino de projetos e ensino de estruturas, no princípio de forma empírica, mas que ao longo do tempo foram sendo moldados de acordo com as reflexões suscitadas nos experimentos anteriores e em uma construção teórica. Este processo não linear possibilitou no decorrer da prática dos experimentos, que houvesse uma aprendizagem por meio da reflexão sobre o engajamento dos participantes, a adequação da abordagem e das ferramentas de ensino, o desempenho dos professores participantes, os produtos desenvolvidos e a percepção dos estudantes com relação ao aprendizado. Para Dubberly e Pangaro (2015a), a conversa promove entre os participantes uma relação ética (acordo com os objetivos), cooperativa (acordo com os meios), inovadora (criação de uma nova linguagem) e responsável (criação de um novo processo).

No modelo disciplinar de ensino de estruturas nos cursos de arquitetura, principalmente nos que adotam o método analítico, não há possibilidades de *feedbacks*, sendo criado um processo linear, que diverge do modo não linear próprio da prática de ensino do projeto

arquitetônico. De acordo com Dubberly e Pangaro (2015a), o processo linear não permite a iteração, que seria a correção do erro, e a convergência de objetivos entre os agentes participantes, limitando a aprendizagem a *feedbacks* simplificados. Dessa maneira, para a proposição de uma abordagem de modelo conversacional entre o ensino de projetos e estruturas, foi importante considerar o processo de experimentação com as disciplinas híbridas como um sistema com a possibilidade de múltiplos *feedbacks*, promovendo circularidade e recursividade. Para tanto, foi fundamental estruturar este sistema não-linear, tanto internamente na prática efetiva de cada um dos experimentos, quanto externamente na percepção dos experimentos enquanto um conjunto.

Conceitualmente, consideramos que o conjunto das disciplinas se constituiu como um processo de *experimentação-na-ação*, que de acordo com Schön (1987) se constitui da combinação dos processos de *conhecer-na-ação* e de *reflexão-na-ação*. O processo de *conhecer-na-ação* trata-se de um tipo de conhecimento que se revela no ato, que consiste em uma *performance* que possibilita contínuas detecções e correções de erros, tendo dessa maneira a capacidade de gerar novos processos de *conhecer-na-ação*, uma vez que os praticantes se comportam como pesquisadores e não como especialistas. Os procedimentos de *conhecer-na-ação* propiciam a constituição de um processo recursivo de construção e avaliação circular, que se constitui de acordo com Schön em uma prática reflexiva, composta por processos de *reflexão-na-ação*, *reflexão sobre a ação* e *reflexão sobre a reflexão-na-ação*.

Dessa maneira, para organizar uma abordagem sistêmica para observação dos experimentos e os processos de reflexão decorrentes, propusemos estruturá-la utilizando além da referência teórico-conceitual de Schön, os modelos cibernéticos de Pangaro baseados na Teoria da Conversação. Essa estruturação visou não somente a estabelecer critérios de observação dos *feedbacks* e seleção de *outputs* que serviriam como *inputs* para o próximo experimento, mas buscou de maneira epistemológica a construção de um sistema de aprendizagem reflexivo entre o ensino de projetos e o ensino de estruturas, tendo como horizonte desenvolver procedimentos não conservativos orientados para uma prática tectônica por meio de conversa interdisciplinar.

3.4 A conversação como método de observação

Para a observação interna dos experimentos, foi proposta a construção de um modelo linear de *conhecer-na-ação* seguida por análise e reflexão recursiva realizada por meio de um modelo de *reflexão-na-ação*, utilizando como referência para esta construção o modelo conversacional desenvolvido por Pangaro (2009). A escolha do modelo de conversação cibernético proposto para estruturar a observação dos experimentos realizados decorre da proposta de fazê-lo enquanto uma prática reflexiva que potencialmente pode levar a um modelo de conversa entre arquitetos e engenheiros no ensino de projetos. Os modelos cibernéticos são baseados em um estudo profundo da interação entre *humanos e humanos* e *humanos e máquinas*, em que se acredita que somente na conversa é possível aprender novos conceitos, compartilhar e evoluir conhecimentos e confirmar concordância, em que a saída (*output*) de um sistema de aprendizagem torna-se a entrada (*input*) para outro. Dessa forma, consideramos que a utilização desse modelo enquanto método foi fundamental para a observação, análise e reflexão acerca dos experimentos realizados.

3.4.1 Conhecer-na-ação

Pask (1980 *apud* PANGARO, 2017) considera que, para uma conversa ocorrer, algo deve ser transformado para um ou mais participantes, seja a compreensão do assunto, dos conceitos, das intenções ou dos valores. Se esta transformação não ocorre, o que aconteceu foi uma mera troca de mensagens. Para Dubberly e Pangaro (2009), o processo de conversação somente ocorre quando seus participantes executam as seguintes tarefas:

1. Abrem um canal de conversa enviando uma mensagem inicial que seja de interesse comum;
2. Comprometem-se a se envolverem com um comprometimento simétrico entre participantes;
3. Constroem significado, em que a base da conversação deve ser o compartilhamento de contextos, com linguagem e normas sociais comuns;
4. Evoluem, já que a conversa afeta ambos os participantes, em que as mudanças trazidas pelas conversas têm valor duradouro;

5. Convergem para um acordo através de objetivos comuns;
6. Desenvolvem relações de cooperação;

No modelo de conversação proposto por Pangaro (2009) (FIG. 27), o *Participante A* é o que inicia o processo de colaboração através da conversação, estabelecendo os objetivos iniciais de acordo com o seu ponto de vista, articulando a lógica de condução da conversa, considerando que novos objetivos e novas oportunidades podem surgir durante o processo. O *Participante A* tem acesso à estrutura de aprendizagem, mas é ignorante com relação a alguns tópicos. O *participante B* deve dar respostas às perguntas do *Participante A* fornecendo as demonstrações adequadas (PASK,1976b).

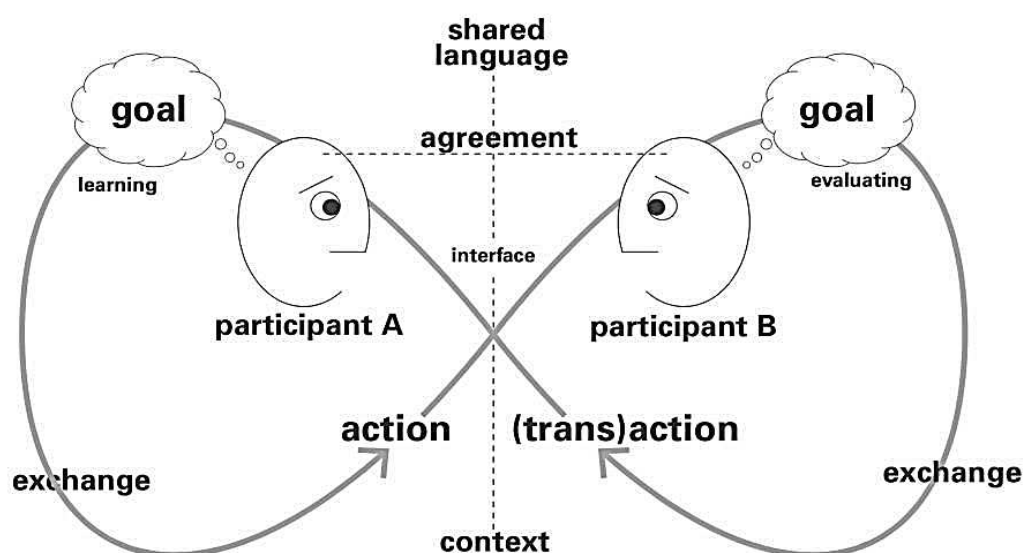


FIGURA 27 - Diagrama dos fundamentos da conversação
Fonte: PANGARO, 2017.

Dessa forma, a conversação inicia somente quando um dos participantes tem algum tipo de objetivo, específico ou geral, estando esse articulado com a linguagem e o contexto. Sendo assim, Pangaro (2009) sistematiza o que seria um modelo conversacional e estabelece elementos fundamentais para sua organização:

1. *Contexto*: momento, situação, lugar ou história compartilhada;
2. *Linguagem*: meio compartilhado inicial para transmitir significado;

3. *Acordo*: entendimento compartilhado dos conceitos, intenções, valores que levam a uma ação;
4. *Engajamento*: disponibilidade para a interação, resultado de uma linguagem compartilhada e um contexto propício para a interação que pode construir um acordo;
5. *Ação e (Trans)ação*: fluxo da conversação cooperativa, sendo esta circular e recursiva.

Para o desenvolvimento do modelo de observação dos experimentos, consideramos que o *Participante A*, ou seja, aquele que demanda o diálogo, é o ensino de projetos (estudantes e professores de arquitetura), e o *Participante B*, sendo aquele que possui as respostas necessárias para as perguntas realizadas pelo *Participante A*, é o ensino de estruturas, podendo este constituir-se por máquinas (*softwares* de análise estrutural) ou homens (professor de estruturas) conforme iremos relatar a seguir:

3.4.1.1 Conversa *homem-máquina*

No primeiro modelo construído estruturado como uma conversa *homem-máquina*, o *Participante A* é o professor de projetos e seus alunos, e o *Participante B*, é o método computacional por meio de *software* de análise estrutural. Neste processo, o computador é entendido como um sujeito do diálogo, mas sem um objetivo. O Participante A estabelece diálogo com o computador em dois momentos: no primeiro, o professor de projetos seleciona e verifica as possibilidade de *feedbacks* do software de acordo com o seu objetivo, que no caso seria o desenvolvimento de projetos baseados em *performance*; e no segundo momento, os alunos, interagem e iteragem com o *software* em processos de otimização, geração ou *form-finding* estrutural (FIG. 28).

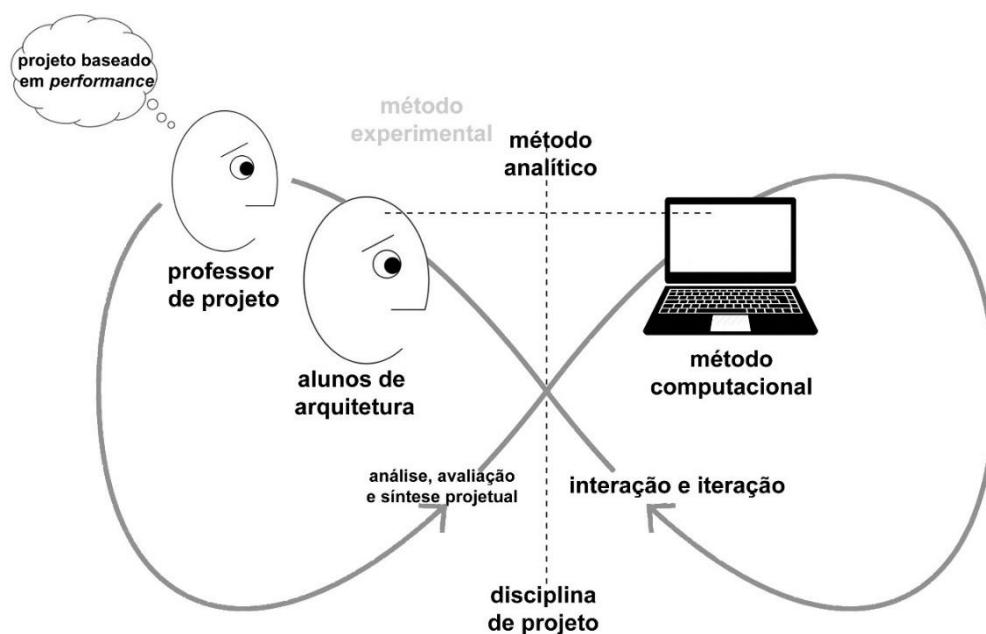


FIGURA 28 - Modelo conversacional *homem-máquina* adaptado de Pangaro (2017)
 Fonte: elaboração da autora

Neste processo, o método analítico ainda permanece enquanto a linguagem comum entre os participantes para analisar e avaliar os *outputs* gerados pelo *software* para que estes dados informem a síntese projetual. Desta maneira, as deficiências na compreensão do método analítico decorrentes de um percurso de ensino fragmentado e esvaziado faz com que os alunos percebam de forma mais acentuada a ausência de ferramentas de avaliação dos modelos estruturais. Esta percepção ocasiona a necessidade de retomar os estudos das disciplinas de estruturas, o que acaba não sendo compatível com o tempo da disciplina; ou, demanda de forma mais direta a inclusão de um professor de estruturas no processo de projeção para auxiliá-los na interpretação dos resultados obtidos na simulação do comportamento estrutural gerado pelo *software*.

Sendo assim, reconhecendo os limites da conversa *homem-máquina*, o que se percebe com a construção deste modelo é que a troca de informações ocorrida tem apenas uma característica dialógica, não se constituindo enquanto uma prática dialética, uma vez que a máquina não representa de fato um sujeito, mas somente uma ferramenta que facilita a interação e a iteração com o modelo estrutural. A iteração computacional se diferencia da interação por ser estabelecido um objetivo, mas pode ser considerada um diálogo, ainda assim, não se configura enquanto uma conversa, pois é somente responsiva e não tem

intencionalidade, o que faz com que não haja um processo dialético necessário para que ocorra um processo conversacional. Dessa maneira, a introdução de um elemento humano no *Participante B* é que possibilita que as trocas realizadas com a máquina se efetivem de fato enquanto relações de conversa.

3.4.1.2 Conversa *homem-máquina-homem*

Nesta ampliação do modelo de conversa *homem-máquina*, o professor de estruturas é incluído como um agente com intencionalidade na figura do *Participante B*, o que abre novos canais de interação a serem trabalhados. Podemos considerar que demanda de inclusão do engenheiro supre a incapacidade da máquina de compreensão do contexto, assim como aborda Negroponte (1969). Dessa maneira, a participação de mais um agente no modelo, promove a ampliação das interações que podem ocorrer simultaneamente, propiciando que as trocas ocorridas com o *Participante B* sejam não somente dialógicas, mas também dialéticas.

O professor de projetos que conforma juntamente com os alunos como *Participante A*, tem um papel fundamental neste modelo, uma vez que deve promover um acordo e um engajamento entre todos por meio da construção de um objetivo comum, devendo ser realizada a fim de evitar ruídos e, por consequência, conflitos de valores e objetivos entre os participantes. Segundo Pask (1980), uma pessoa pode simultaneamente ter a perspectiva de mais de um participante, unificando a conversação interna. Ao adotar diferentes papéis, este participante deve ponderar os méritos das diversas hipóteses que podem surgir dos outros participantes. Caso não haja acordo e engajamento com o *Participante B* na figura do professor de estruturas, todo o processo pode levar a uma transação conflituosa, ou até mesmo inviabilizar que esta ocorra. No caso da experimentação realizada, o papel do professor de projeto é promover o engajamento de todos os participantes por meio do desenvolvimento de projetos com um viés tectônico (FIG. 29).

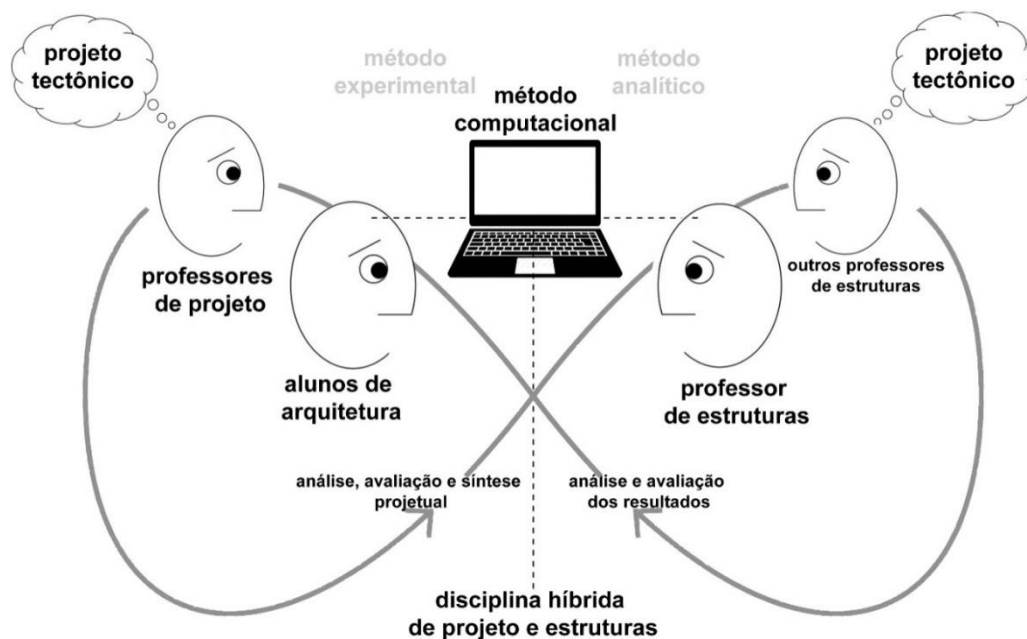


FIGURA 29 - Modelo conversacional *homem-máquina-homem* adaptado de Pangaro (2017)
 Fonte: elaboração da autora

A *máquina* neste processo é ao mesmo tempo linguagem comum e sujeito, e a interação e a iteração deixam de ser uma transação explícita, passando a ser uma condição ímplicita de todo o processo. A interação neste caso passa a ser desde um processo linear de *conhecer-na-ação* seguido por um processo de *reflexão-na-ação* dentro de cada experimento até um processo de aprendizagem autorregulado do sistema de experimentos conforme veremos adiante.

3.4.2 Reflexão-na-ação e a construção de um sistema de aprendizagem

Dubberly *et al.* (2009) problematizaram a interação e os formatos que essas interações podem assumir. Um sistema linear de interação possui uma forma simplificada e limitada, uma vez que não há um processo de autorregulação. O processo de *conhecer-na-ação* que estamos propondo consiste em um processo linear de interação (FIG. 30), em que os *inputs* se constituem da análise do contexto; o processo da definição da linguagem, do acordo e do engajamento proposto; e, os *outputs* da ação e da (trans)ação gerada, podendo se configurarem na construção de um produto ou em um processo de projeto.

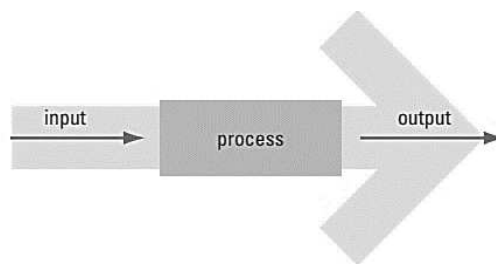


FIGURA 30 - Sistema linear
Fonte: DUBBERLY *et al.*, 2009

A *reflexão-na-ação* foi fundamental para propiciar a autorregulação dos sistemas construídos internamente em cada uma das disciplinas, de tal maneira a identificar pressupostos, hipóteses e procedimentos a serem conservados, refutados ou potencializados. De acordo com Dubberly *et al.* (2009) o sistema de auto regulação (FIG. 31) busca reter e manter os elementos bem-sucedidos identificados nos sistemas, em que o *output* de um sistema regulador pode ser o *input* para um novo sistema linear.

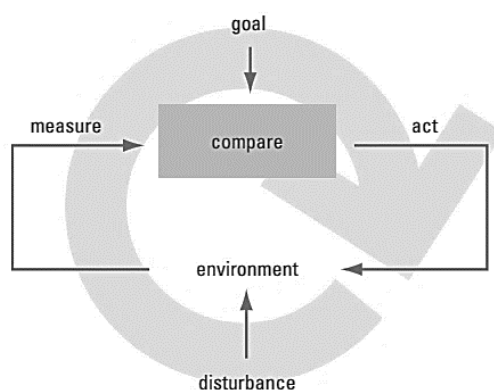


FIGURA 31 - Sistema autorregulatório
Fonte: DUBBERLY *et al.*, 2009

Dessa forma, para a construção de um processo de autorregulação, propusemos observar cada um deles de maneira reflexiva, buscando identificar os elementos fundamentais para que haja recursão para os próximos experimentos. Dessa forma, para promover a construção de uma estrutura de autorregulação, nos baseamos no modelo de design coevolucionário de Pangaro (2011), que consiste em um modelo conversacional circular de reflexão orientada para a exploração de novas possibilidades de projeto (FIG. 32). Para Pangaro (2011), os *loops de feedbacks* iterativos aumentariam a variedade de soluções, sugerindo que o projetista possa fazer melhores escolhas em iterações subsequentes. Estas iterações ocorreriam entre quatro elementos interconectados:

- A. *Conversa para o acordo acerca dos objetivos*: reflexão sobre os objetivos;
- B. *Conversa para desenhar o processo*: identificação dos conhecimentos insubstituíveis e reflexão sobre os procedimentos que levaram (ou não) ao engajamento com os objetivos;
- C. *Conversa para criar uma nova linguagem*: reflexão sobre as deficiências e as oportunidades da linguagem utilizadas para o desenvolvimento do processo;
- D. *Conversa para o acordo sobre os meios*: elaboração de um novo plano de ações baseado em novos objetivos.

Essas conversações ciberneticamente circulares servem como base para se chegar a acordos, que potencialmente podem gerar novas linguagens, podendo estas novas linguagens ser aprimoradas para a inclusão de novos agentes participantes. A linguagem compartilhada também pode criar uma nova variedade que evolui através de conversas entre os participantes. Desacordos também podem levar a novas ideias, pois estimulam perguntas e podem sugerir novas soluções, sendo inclusive desejados, pois acrescentam variedade às interações e podem levar a novos modelos e possibilidades.

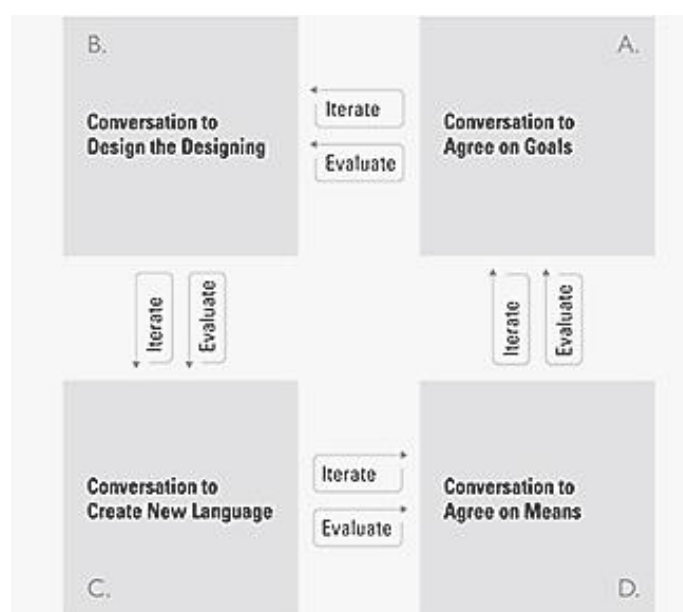


FIGURA 32 - Modelo de design co-evolucionário
Fonte: PANGARO, 2011.

O modelo de *design* coevolucionário foi criado principalmente para lidar com problemas

complexos ou os chamados *wicked problems*¹²⁹, que consideram que as interações entre participantes podem vir a se constituir enquanto um problema complexo uma vez que trazem uma série de ambiguidades, sendo necessário o desenvolvimento de um constante processo de recursividade e autorregulagem do processo de interação linear. Dessa forma, o processo de *reflexão-na-ação* que estamos propondo para a análise dos experimentos está intrinsecamente relacionado com o processo de *conhecer-na-ação*, uma vez que possibilita uma seleção de ações e procedimentos que devem ser conservados, refutados ou potencializados nos próximos experimentos.

A observação dos experimentos como um sistema demandou a construção de um processo de *reflexão sobre a ação*, que chamaremos de reflexão sobre os experimentos. Para tanto, buscamos identificar a contribuição de cada experimento para o sistema de *experimentação-na-ação* construído para o trabalho, visualizando assim como ocorreu a dinâmica de recursividade e aprendizagem entre eles. Os *outputs* gerados por um experimento não necessariamente serviram como *inputs* imediatos para o experimento cronologicamente seguinte, não tendo ocorrido uma seqüência linear de recursão, mas sim um processo circular de reflexão. Desta maneira, nem todos os experimentos tiveram o mesmo objetivo, tendo sido classificados, baseado na abordagem de Schön (1987), como *experimentos exploratórios*, *teste de movimento* ou *teste de hipóteses*, o que veremos mais adiante. Os *experimentos exploratórios* e os experimentos de *teste de movimento* serviram como experimentos auto regulatórios, tendo como objetivo alcançar o equilíbrio por meio de sistemas concorrentes. Já os experimentos realizados como *teste de hipóteses* consistiram em um *output* de objetivos e ações resultantes dos experimentos auto reguladores, buscando manter e potencializar ações de sucesso, e, combater os distúrbios ocorridos. Esta construção foi importante para identificar o papel que cada experimento exerceu para a construção sistêmica do trabalho, possibilitando dessa maneira, a construção de um terceiro nível de observação.

¹²⁹ Pangaro (2011) se refere aos chamados *wicked problems*, ou, na tradução, problemas perversos, que significa problemas de natureza ambígua, tendo esses requisitos incompletos, contraditórios ou mutáveis. Não existem soluções claras para os problemas perversos e a tentativa de resolução de um aspecto pode revelar ou criar outros problemas. Dessa maneira, a abordagem dos problemas de projeto enquanto problemas perversos traz a necessidade de contextualização da sua solução, uma vez que cada problema tem suas particularidades, não podendo haver soluções replicáveis.

Este processo versa, em acordo com Dubberly *et al.* (2009), na construção de um sistema de aprendizagem, que consiste em uma combinação de múltiplos sistemas reguladores (FIG. 33). Neste processo, os múltiplos sistemas passam a ser autorregulados de forma a haver uma redefinição de objetivos e ações, tanto dos sistemas lineares, quanto do próprio sistema de aprendizagem. Desta maneira, “aprender” significa saber quais sistemas de autorregulação podem combater distúrbios no ambiente, o que nesta tese, significaria buscar procedimentos não conservativos procurando combater os processos nocivos dos procedimentos de ensino orientados para práticas conservativas. Para Dubberly *et al.* (2009), quando um sistema de aprendizagem fornece entrada para um sistema auto regulador, o sistema de aprendizagem pode avaliar os efeitos de suas ações e aprender, também se tornando em um segundo nível um sistema auto regulador.

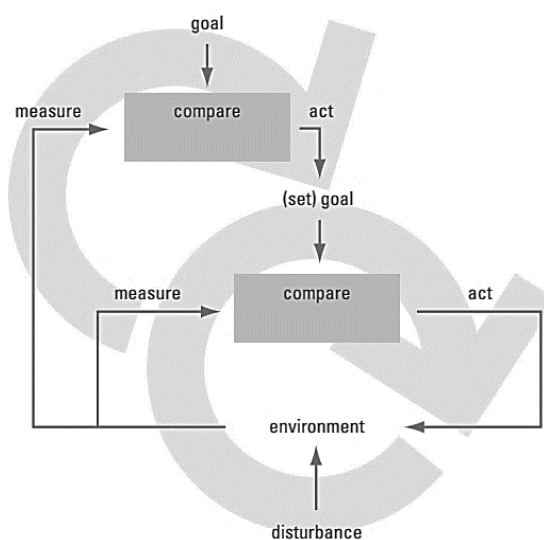
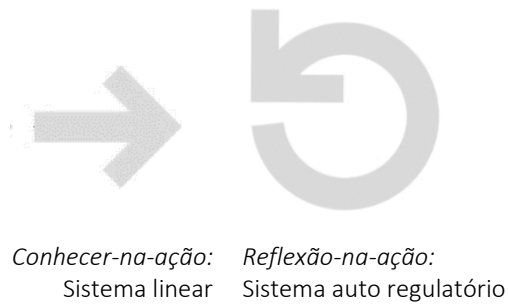


FIGURA 33 - Sistema de aprendizagem
Fonte: DUBBERLY *et al.*, 2009.

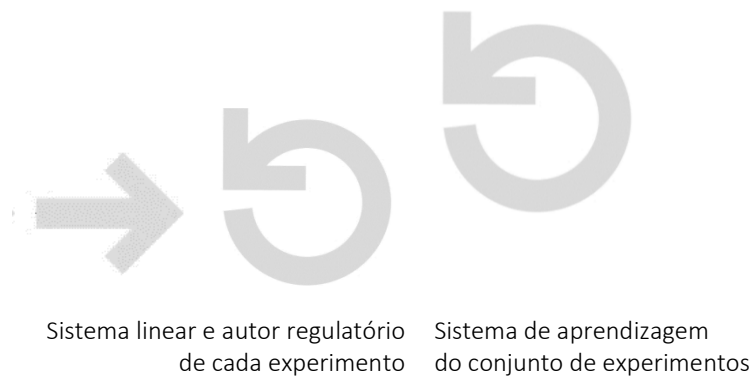
Desta forma, a abordagem reflexiva sistêmica dos experimentos resultou em um terceiro nível de reflexão que se configurou enquanto um processo autorregulador de *reflexão sobre a reflexão-na-ação* do sistema de aprendizagem, em que foi possível apontar uma seleção de ações e procedimentos que apresentaram maior potencial para o desenvolvimento das relações das relações conversa entre arquitetos e engenheiros no ensino de projetos, e que, portanto, deveriam ser potencializadas em uma nova proposta de *experimentação-na-ação*. Isto coincide com o que Dubberly *et al.* (2009) caracterizam como um sistema de interação

baseado em conversa, em que a saída de um sistema de aprendizagem se torna a entrada para outro. Desta maneira temos esquematicamente a seguinte construção para observação, reflexão e auto regulação do sistema de aprendizagem proposto para o processo de *experimentação-na-ação* (FIG. 34):

1. OBSERVAÇÃO DOS EXPERIMENTOS



2. REFLEXÃO SOBRE A AÇÃO



3. REFLEXÃO SOBRE A REFLEXÃO-NA-AÇÃO



FIGURA 34 - Sistema de aprendizagem autorregulado do processo de *experimentação-na-ação*
Fonte: elaboração da autora

Sendo assim, teríamos a construção de um sistema de interação entre arquitetos e engenheiros no ensino de projetos baseado em uma concepção conversacional. No entanto, de acordo com Dubberly *et al.* (2009) a interação propiciada pela conversa entre dois agentes ou sistemas, pode ser caracterizada de duas formas. Na interação referenciada, o primeiro sistema afeta ou direciona o segundo, mas não é afetado por ele, ou seja, o *Participante A* se modifica com a interação, mas o *Participante B* não se altera em sua estrutura. No entanto, para que uma interação se caracterize enquanto conversa, os dois sistemas devem ser afetados e se modificarem após o processo conforme propõe Pask (apud Dubberly *et al.*, 2009) em seu sistema denominado “sistema de interação referenciado *eu/você*”¹³⁰, em que os sistemas aprendem um com outro mutuamente (FIG. 35). Nessa proposta os sistemas podem descobrir novos objetivos, passando a trocar informações de interesse, podendo coordenar metas e ações conjuntas. Esses sistemas de aprendizagem baseados em conversa podem ser organizados em equipes multidisciplinares, conforme propusemos na prática dos experimentos, ou consistirem em sistemas de aprendizagem organizados em mercados ou comunidades.

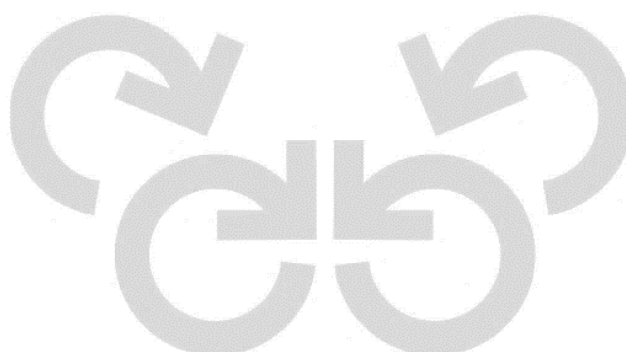


FIGURA 35 - Sistema de conversa
Fonte: DUBBERLY *et al.*, 2009

Para Dubberly *et al.* (2009) a interação, bem como a coordenação de metas e ações entre um grupo de pessoas é política. Dessa forma, substituir um sistema linear por um modelo de interação baseado em conversa pode propiciar formas novas e mais ricas de interação *homem-máquina* em práticas de projeção. Os apontamentos gerados por esta reflexão foram fundamentais para a construção de uma abordagem sobre a relação entre estruturas e projeto de arquitetura e das possibilidades de reconstrução das práticas de projeção por meio do desenvolvimento de relações de conversa *homem-máquina-homem*.

¹³⁰ Do original em inglês: “I/You-referenced” interaction (DUBBERLY *et al.*, 2009, p. 11).

PARTE III: EXPERIMENTAÇÃO-NA-AÇÃO

3.5 Observação dos experimentos

3.5.1 EXPERIMENTO 1: Projeto em Estruturas de Concreto Armado

CONHECER-NA-AÇÃO:

Contexto Experimento realizado no 2º semestre de 2016 em disciplina regular do currículo do curso de Arquitetura e Urbanismo da PUC Minas (PUCMG, 2008), ofertado para alunos do 5º semestre, denominada “Projeto em Estruturas de Concreto Armado”. A disciplina foi conduzida por esta autora, com 18 (dezoito) alunos matriculados, e com a participação de um engenheiro de estruturas especialista em cálculo de concreto armado¹³¹.

Linguagem Desenvolvimento de projeto arquitetônico utilizando métodos experimentais (uso do *Kit Mola*¹³² e confecção de protótipos manuais) e método analítico para verificação e validação das propostas de pré-

¹³¹ O engenheiro civil Lucas Oliveira Ladeira é mestre em Engenharia de Estruturas pela UFMG com ênfase em estruturas de concreto armado e fundações e atua como projetista para diversas empresas nacionais e multinacionais. Atualmente também é professor de graduação e pós-graduação em Engenharia Civil na PUC Minas.

¹³² O *Kit Mola* é um material/modelo didático-experimental interativo que simula de forma qualitativa o comportamento de estruturas arquitetônicas composto por um conjunto de peças moduladas, que se conectam através de magnetismo, permitindo inúmeras combinações (OLIVEIRA, 2017).

dimensionamento estrutural.

Acordo

Conforme plano de ensino fornecido pela coordenação do curso (ANEXO A), a disciplina teve por objetivo capacitar os alunos a compreenderem o comportamento das estruturas de concreto armado em sua dimensão técnica, funcional e estética, adquirindo a habilidade de realizar o pré-dimensionamento da estrutura e consolidar um repertório de informações técnicas para uma “profícua interlocução com o calculista”.

Engajamento

O plano de ensino sugeriu como métodos didáticos utilizar aulas teóricas expositivas, aulas práticas em ateliê, visitas técnicas e atividades no canteiro experimental, sendo estas últimas condicionadas à disponibilidade de alunos e professores, compreendendo a dificuldade de realização por se tratar de um curso noturno. O curso da PUC Minas tem uma orientação de ensino e aprendizagem de conceitos estruturais por meio de exercícios projetuais. Dessa maneira, a disciplina se fundamentou na realização de projeto arquitetônico como exercício de aplicação do material e realização do pré-dimensionamento estrutural (APÊNDICE C).

Como proposta de exercício projetual sugeriu-se a concepção do pavilhão do Brasil conforme o escopo do concurso da exposição Expo Milão 2015. Para tanto, os estudantes, organizados em grupos de até 3 membros, deveriam realizar a concepção estrutural do projeto em concreto armado vislumbrando uma expressividade plástica da estrutura, idealizando um estudo de tipologia estrutural por meio de protótipos e pré-dimensionamento através de cálculo pelo método analítico. Para orientar a concepção da geometria e sua relação com os esforços, propôs-se utilizar como referência sistemas estruturais descritos no livro *Sistemas Estruturais* de Heino Engel (2001) e as tabelas de pré-dimensionamento do livro *A Concepção Estrutural e a Arquitetura* de Yopanan Rebello (2001). Como ferramenta de estudo e

prototipagem para o exercício projetual, foi proposta a utilização do *Kit Mola*, a partir da qual se esperava que os estudantes conseguissem montar seus modelos e visualizar o comportamento estrutural, realizando um processo iterativo manual, anteriormente à abordagem quantitativa de pré-dimensionamento. Posteriormente, para a realização do pré-dimensionamento, foram realizadas aulas expositivas teóricas em que foi abordado o método de cálculo da seção transversal dos pilares por meio de área de influência e conceitos relacionados ao pré-dimensionamento de vigas.

Ação e (Trans)ação Nos primeiros encontros, foram realizadas aulas expositivas de abordagem qualitativa e foi feita a proposição do tema de projeto, momentos estes em que os estudantes se mostraram animados e participativos. A turma, composta por dezoito alunos, foi dividida em seis grupos de três participantes para o desenvolvimento das duas etapas de projeto, que consistiria em estudo preliminar e pré-dimensionamento.

A possibilidade de desenvolvimento do projeto auxiliado pelo *Kit Mola* gerou um grande entusiasmo, pela promessa de compreensão do comportamento estrutural por meio da visualização e da possibilidade de interação por meio da manipulação física dos elementos. No entanto, após o entusiasmo inicial dos estudantes, a maioria dos grupos decidiu não utilizar a ferramenta devido a sua falta de flexibilidade com relação ao tamanho das barras, o que levava a resultados geométricos altamente prescritos.

O único grupo que iniciou a concepção estrutural no *Kit Mola* não sentiu uma correspondência direta com a forma pretendida, havendo a necessidade de produzirem outro protótipo em papel para o estudo de geometria (FIG. 36). O uso do *Kit Mola* foi claramente inadequado para a abordagem proposta, em termos simbólicos e materiais. Esta

ferramenta é adequada para explorar o comportamento de estruturas em barra, no entanto, mesmo para estruturas em barra, por não ser possível informar as propriedades materiais e o carregamento incidente, o *Kit Mola* não possibilita uma simulação material, estando restrito a demonstrar o comportamento genérico de barras utilizando preceitos da Lei de Hooke. A escolha da ferramenta foi inadequada devido à orientação de projeto, em que a orientação foi de que as estruturas projetadas deveriam explorar a plasticidade do material, tendo como objetivo implícito o desenvolvimento de projetos em que a estrutura seria trabalhada como ornamento.

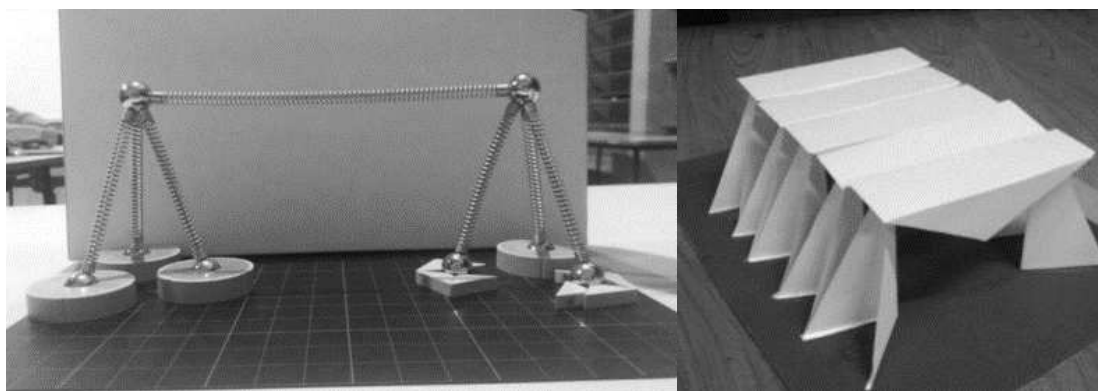


FIGURA 36 - Estudo de geometria no *Kit Mola* (à esquerda) e em protótipo (à direita)¹³³
Fonte: Arquivo pessoal da autora

Dessa forma, como os demais grupos não chegaram a se engajar com o uso do *Kit Mola* para a concepção do projeto, foi sugerido que estes produzissem seus próprios protótipos físicos para o estudo da forma. Como os protótipos construídos pelos estudantes não apresentaram a possibilidade de visualização das deformações, e fato que acreditou-se que poderia ser possível de ser realizado com a utilização do *Kit Mola*, foi exigido que, por meio do modelo, os estudantes tentassem mapear os fluxos de força existentes, numa tentativa de sensibilizá-los para a percepção do comportamento estrutural (FIG. 37). No entanto, de acordo com Black e Duff (1994), visualizar a distribuição de força numa estrutura complexa, altamente indeterminada, é quase impossível. Para

¹³³ Protótipo elaborado por Sarah de Souza Nascimento, Natália Fernanda Neves e Maria Paula de Oliveira Loura.

Black e Duff (1994) esse raciocínio é extremamente complexo, só podendo ser percebido por meio da análise dos deslocamentos da estrutura. Dessa forma, os estudos dos fluxos de força não foram suficientemente eficientes, uma vez que se tratava de uma representação proposta pelos alunos, não havendo ferramenta adequada para verificação do comportamento imaginado.

Mesmo tendo sido analisado o comportamento dos modelos e a deformação sofrida ao simular uma aplicação de carga, os materiais utilizados para os protótipos nem sempre apresentavam a rigidez e a elasticidade adequada, não tendo possibilitado uma visualização eficaz. Os estudantes se sentiram parcialmente frustrados por não terem conseguido “intuir” o comportamento do material por meio de protótipos. Para tentar atenuar a notória perda de confiança dos estudantes com o trabalho realizado, foi convidado um engenheiro de estruturas especialista em concreto armado para conversar com cada grupo sobre a proposta estrutural apresentada. O objetivo da promoção dessa conversa foi uma tentativa de simular um processo circular e recursivo entre arquitetos e engenheiros, em que haveria uma avaliação da estrutura de tal maneira que essa informasse o processo de síntese arquitetônica. No entanto, essa conversa não se consolidou como um processo recursivo, uma vez que o engenheiro de estruturas considerou todas as propostas válidas, alegando que “qualquer estrutura poderia ser realizada em concreto armado”. Essa experiência acabou por reproduzir uma relação de monólogo, em que o arquiteto tem autonomia para realizar qualquer forma que considerar pertinente, e o engenheiro, em sua atuação, deverá conseguir de maneira heroica realizá-la materialmente.

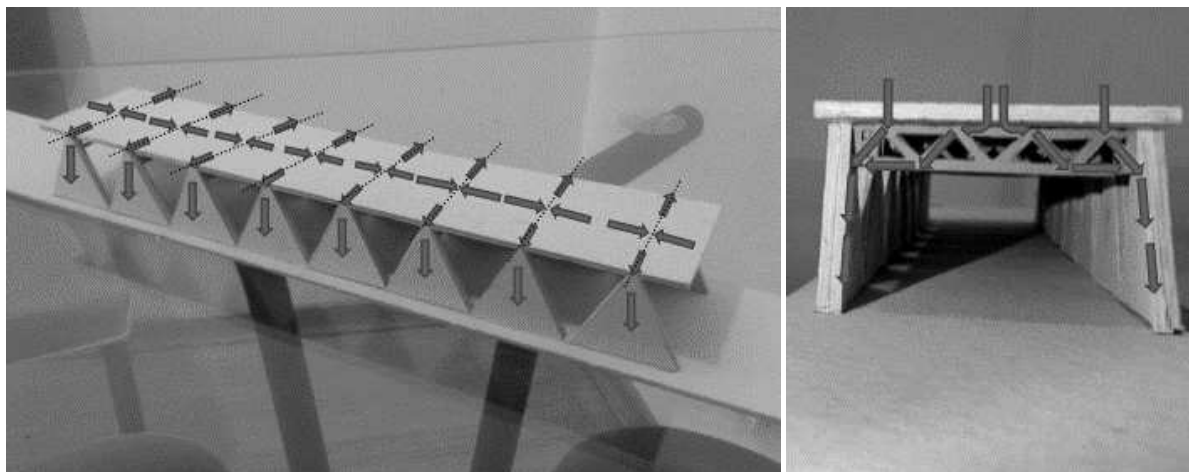


FIGURA 37 - Estudo dos fluxos de força¹³⁴
Fonte: Arquivo pessoal da autora

Após a conversa com o engenheiro, a segunda etapa do processo consistiu em realizar o pré-dimensionamento da estrutura por meio de método analítico. Para tanto foi necessário rever alguns conceitos de análise estrutural e resistência dos materiais, já que alguns estudantes ainda não tinham familiaridade com conceitos básicos de cálculo estrutural. Por meio de aulas expositivas foram revisados os conceitos de força, reação de apoio, construção de diagramas de momento fletor e cisalhamento.

Nas aulas expositivas em que foram abordados conceitos relacionados ao método analítico, houve resistência por parte de alguns estudantes em exercitar os conteúdos quantitativos, havendo uma quebra de expectativa com relação à abordagem da disciplina. Esses estudantes, que representavam em torno de 25% dos matriculados, questionaram a pertinência de se aprender conceitos matemáticos, manifestando que gostariam de aprender somente conteúdos qualitativos relacionados ao concreto armado. Após conversa, foi exposta a pertinência da realização do pré-dimensionamento como forma de validar ou refutar a proposta de síntese projetual, tendo este argumento sido compreendido e acatado pelo grupo.

¹³⁴ Protótipo elaborado por Kamila Bhering dos Santos, Lucas de Souza Lima e Matheus Barroso.

Na realização do pré-dimensionamento, os estudantes desenvolveram cálculos manuais, o que se mostrou um processo extremamente trabalhoso. A maior parte dos alunos não apresentou grandes dificuldades com os cálculos, mas alguns deles se mostraram insatisfeitos em ter que aprender uma linguagem matemática abstrata no contexto do curso de arquitetura, que consideravam ser um curso essencialmente de abordagem qualitativa. Após aproximadamente três aulas de orientação para o cálculo de pré-dimensionamento de lajes, vigas e pilares, os grupos obtiveram os primeiros resultados de cálculo. Ao obterem resultados insatisfatórios, os estudantes ficavam desmotivados para propor novas soluções e refazerem todos os cálculos devido à morosidade e à grande quantidade de trabalho manual envolvido no processo. As formas geométricas propostas também tiveram que se adaptar às limitações que o método de cálculo apresentava.

O processo iterativo manual combinado com o método analítico se mostrou apenas parcialmente eficiente neste experimento, mas propiciou algumas importantes reflexões. Os grupos conseguiram perceber algumas limitações da aplicação do material com relação à geometria e às seções transversais propostas. Um dos grupos, por exemplo, propôs o desenvolvimento de uma laje nervurada hexagonal,¹³⁵ tendo feito inicialmente estudos da forma através de croquis e modelos físicos com palitinhos de madeira (FIG. 38).

¹³⁵ Projeto A, elaborado por Carolina Cunha, Caroline Rocha e Victor Ruchet.

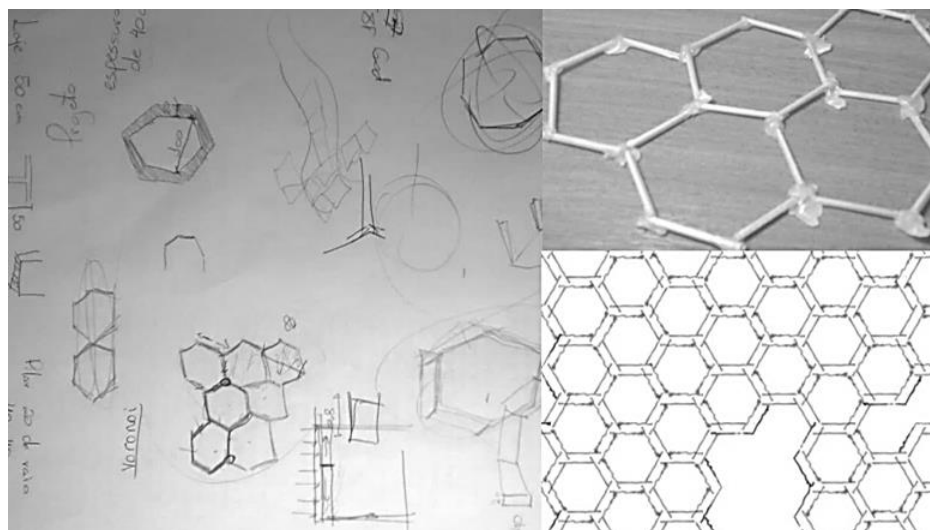


FIGURA 38 – Projeto A: estudo da geometria da laje nervurada hexagonal
Fonte: arquivo pessoal da autora

O grupo iniciou o pré-dimensionamento com o cálculo das lajes, com a expectativa de que a laje nervurada seria o ideal para cobrir grandes vãos. No entanto, na conversa com o engenheiro de estruturas convidado, o grupo foi alertado de que haveria grande dificuldade material e logística em se construir a armação da estrutura no canteiro em formato hexagonal, mas que esta poderia ser considerada de maneira ornamental. Nesse processo, o engenheiro de estruturas se engajou em uma relação de colaboração, instruindo o grupo a realizar uma solução em que a estrutura pudesse estar camuflada sobre os elementos hexagonais, sem comprometer a proposta estética.

Mesmo cientes de que a forma proposta não seria estruturalmente eficiente, o grupo optou por mantê-la já que consideraram a estética desenvolvida essencial para o projeto. Seguindo a orientação do engenheiro convidado, o grupo decidiu considerar a estrutura como uma laje cogumelo, em que as nervuras hexagonais seriam consideradas um elemento de sobrecarga da laje. O grupo realizou os cálculos de momento fletor e cisalhamento, tendo obtido uma espessura para laje plana superior ao que determina a Norma Brasileira para Estruturas de Concreto Armado (ABNT, 2014). No pré-dimensionamento dos pilares utilizando o método de área de

influência, o grupo chegou a resultados de cálculo exorbitantes, o que levou os estudantes a concluir que isso ocorria devido à incompatibilidade da forma geométrica desenvolvida para o sistema construtivo em concreto armado (FIG. 39).

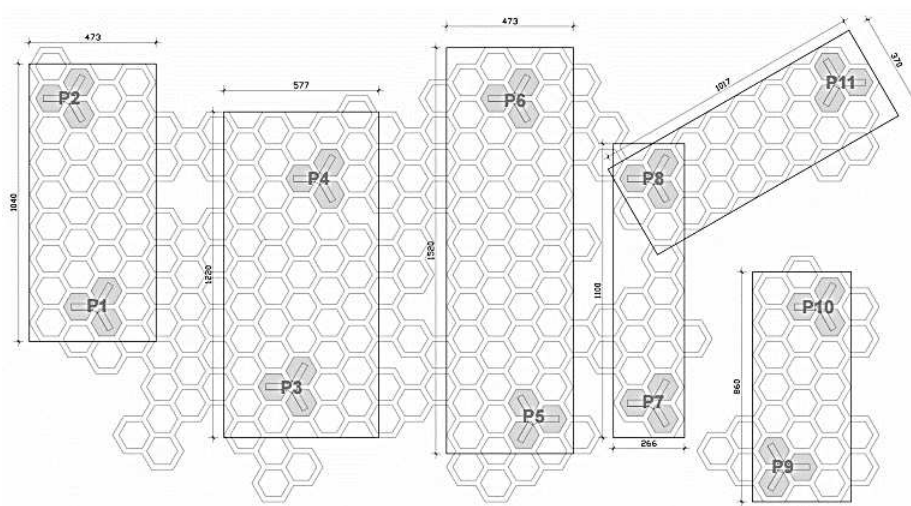


FIGURA 39 – Projeto A: distribuição e cálculo dos pilares por área de influência
Fonte: arquivo pessoal da autora

Como teste final da geometria, o grupo realizou a prototipagem em máquinas de fabricação digital de corte a laser, a partir do que repensaram a distribuição dos pilares e as possibilidades de conexão com a laje (FIG. 40). O desenvolvimento de estratégias para a realização do protótipo estimulou no grupo o desenvolvimento de uma postura crítica com relação à geometria e à escolha do material, concluindo que a estrutura seria mais eficiente em termos estáticos e econômicos se tivesse sido concebida em outro material como o aço ou a madeira.

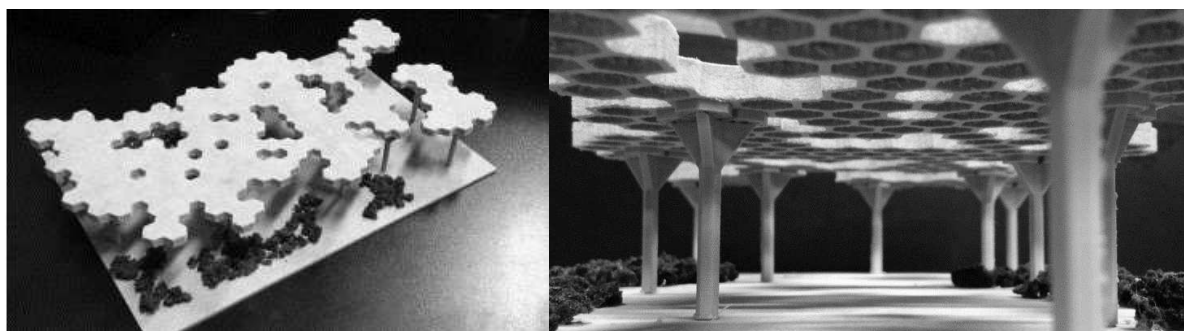


FIGURA 40 - Prototipagem do Projeto A utilizando fabricação digital
Fonte: Arquivo pessoal da autora

*REFLEXÃO-NA-AÇÃO:**Objetivos*

A proposição de desenvolvimento de projeto de caráter simbólico visando uma aproximação com a imitação de uma relação de solilóquio para a síntese da estrutura em concreto armado acabou por reproduzir as relações de monólogo vigentes na prática profissional. O processo também não favoreceu o desenvolvimento de uma relação tectônica no desenvolvimento do projeto, uma vez que a abordagem foi essencialmente formalista, em que a estrutura deveria apresentar apenas uma condição ornamental.

Processo

A utilização do *Kit Mola* com o objetivo de promover a concepção estrutural por meio da visualização e interação com o modelo foi ineficiente, devido à alta prescrição dos elementos, além de ser uma ferramenta mais adequada para o estudo de estruturas em barras, o que não foi o caso da maioria das propostas de projeto. A confecção de protótipos foi parcialmente eficiente: propiciou uma compreensão física da proposta, mas não consistiu em uma ferramenta adequada para a descrição e validação do fluxo de forças. A participação do engenheiro também não propiciou o engajamento em uma relação de conversa, uma vez que reproduziu uma relação de monólogo, em que o arquiteto detém a autoridade sobre a forma proposta, e coube ao engenheiro de estruturas somente a sua validação e execução. O uso de cálculo manual para análise da estrutura e informação da síntese projetual confirmou-se como um processo moroso e ineficiente para a circularidade e recursividade pretendida. No entanto, a construção de protótipo físico por meio de fabricação digital por um dos grupos se mostrou como uma estratégia interessante a ser explorada nos próximos experimentos, uma vez que propiciou uma reflexão acerca da relação geometria x material.

- Linguagem* Os procedimentos e ferramentas utilizados corroboraram a manutenção das relações de monólogo existentes na prática vigente, não tendo propiciado a construção de uma nova linguagem.
- Meios* Esse experimento trouxe aos participantes a percepção da dificuldade de se criar um processo circular e recursivo de concepção estrutural utilizando método analítico para a avaliação e validação, uma vez que não possibilita a visualização e a interação com o modelo. Os protótipos físicos estimulam uma sensibilização do comportamento estrutural, mas não permitem que o processo de síntese arquitetônica seja informado pela sua análise e avaliação. Este experimento confirmou o potencial do uso de linguagem computacional de análise estrutural por meio de conversa *homem-máquina* como forma de estimular o processo circular e recursivo pretendido, uma vez que propicia a visualização, a interação e a iteração do comportamento estrutural por meio da simulação, em que a máquina potencialmente realizaria um processo dialógico com os estudantes de arquitetura, sem haver o risco de reproduzir as relações de monólogo.

3.5.2 EXPERIMENTO 2: Arquitetura e Concepção Estrutural Digital

CONHECER-NA-AÇÃO:

Contexto

Disciplina optativa com proposta de hibridização entre o ensino de projetos e estruturas (APÊNDICE D), ofertada para os alunos dos cursos de Arquitetura e Urbanismo diurno e noturno da UFMG, no 1º semestre de 2017. A disciplina iniciou com 21 (vinte e um) estudantes e finalizou com 11 (onze), sendo 4 (quatro) estudantes do noturno e 7 (sete) estudantes do diurno cursando do 5º ao 10º período.

O grande desafio da disciplina foi inicialmente compreender o nível de conhecimento relativo às disciplinas de estruturas de cada aluno, e, dessa forma, buscar um nivelamento da turma para que todos pudessem compreender os conceitos que seriam apresentados. Dos 7 (sete) estudantes do curso diurno, 5 (cinco) já haviam cursado todas as disciplinas de estruturas obrigatórias ofertadas,¹³⁶ exceto um estudante que não havia cursado a disciplina Estrutura de Madeira, e outro a disciplina de Sistemas Estruturais Aplicados à Arquitetura. Já dos 4 (quatro) estudantes do curso noturno,¹³⁷ 2 (dois) haviam cursado Teoria das Estruturas, três Resistência dos Materiais, 3 (três) Estrutura de Concreto e todos já haviam cursados Estruturas Metálicas.

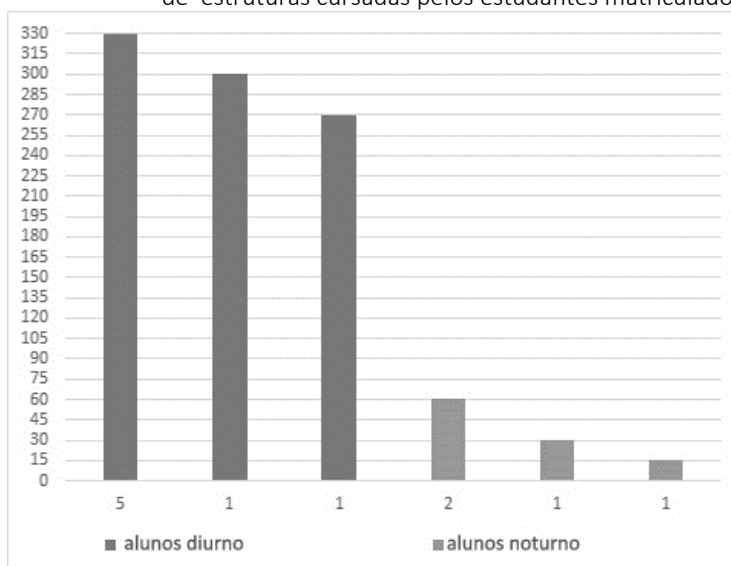
No entanto, o curso noturno, apresenta uma estruturação do projeto pedagógico bastante diferente do curso diurno, tendo 6 (seis) disciplinas obrigatórias no eixo de Sistemas Estruturais, em que estas

¹³⁶ As disciplinas de estruturas obrigatórias do curso de Arquitetura e Urbanismo Diurno (versão curricular 2014/1) são: Introdução aos Sistemas Estruturais (1º período); Análise Estrutural (2º período); Resistência dos Materiais (3º período); Estruturas de Concreto (4º período); Estruturas de Madeira e Estruturas de Aço (5º período); e Sistemas Estruturais aplicados à Arquitetura (6º período).

¹³⁷ As disciplinas de estruturas obrigatórias do curso de Arquitetura e Urbanismo Noturno (versão curricular 2019/1) são: Introdução à Análise Estrutural (1º período); Teoria das Estruturas (2º período); Resistência dos Materiais (3º período); Noções de Estruturas de Concreto, Noções Estruturas de Aço e Misturas de Aço e Concreto, Noções de Madeira e Tópicos em Estruturas (Optativas).

disciplinas são no formato de oficinas de 15 horas.¹³⁸ Com relação à carga horária cursada, percebemos uma discrepância da formação dos estudantes do curso diurno com relação aos estudantes do curso noturno, tendo esses últimos uma carga horária obrigatória de apenas 60 horas, enquanto os do diurno uma carga horária de 330 horas. Essa diferença suscitou preocupação com relação a uma possível discrepância entre os alunos, o que demandou a elaboração de aulas teóricas cujo objetivo seria nivelar os conhecimentos de todos os participantes, de tal forma que não fosse repetitiva para os alunos do diurno, que teoricamente já dominariam a maior parte dos conceitos, ou “desestimulante” para os alunos do noturno, que teriam que aprender uma série de conteúdos complexos em um curto período de tempo.

GRÁFICO 01 - Gráfico comparativo entre carga horária de disciplinas de estruturas cursadas pelos estudantes matriculados



Fonte: elaboração da autora

Linguagem

Proposta inicial de conversa *homem-máquina* utilizando método computacional (análise estrutural pelo *software SAP2000*) e método analítico (para verificação de resultados).

¹³⁸ Foram desconsideradas para esta análise as disciplinas de Arrimos e Contenções e Fundações, já que o enfoque são somente as disciplinas pertencentes ao Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG.

Acordo

Como proposta de abordagem, foi desenvolvido plano de ensino ancorado nos conceitos de *Performance-based Design* (OXMAN, 2006), tendo sido utilizado como referência teórica de projeção de modo que os estudantes estabelecessem metas de avaliação da forma com o objetivo de motivar um processo recursivo. Para isso os estudantes aprenderiam a utilizar *software* gráfico de análise estrutural, em que as informações do comportamento estrutural orientariam o desenvolvimento do projeto, criando interativamente e iterativamente estratégias para a concepção estrutural. As metas de avaliação poderiam ser espaciais, estáticas e/ou construtivas, tendo o estudante a liberdade de estabelecer quantas metas julgasse necessárias para o desenvolvimento do projeto. Para tanto, os conceitos de análise estrutural seriam revisados ao longo da disciplina e diretamente aplicados ao desenvolvimento do projeto, trabalhando simultaneamente uma negociação entre aspectos de geometria, ações, propriedade do material e pré-dimensionamento das seções transversais.

A escolha do programa *SAP2000*¹³⁹ como ferramenta computacional para análise estrutural foi feita a partir da possibilidade de visualização do comportamento da estrutura tridimensionalmente, e da possibilidade de comunicação com os *softwares* de representação CAD, já familiares para os estudantes de arquitetura. O *software* *SAP2000* é convencionalmente utilizado para validação da forma e pré-dimensionamento de projetos de estruturas metálicas pelos engenheiros estruturais (SILVA *et al.*, 2017) e também foi utilizado nos experimentos das Universidades de Berkeley e Harvard-MIT, como vimos anteriormente.

Como proposta para o exercício de projeto, foi sugerido o

¹³⁹ O *SAP2000* é um programa de elementos finitos, com interface gráfica 3D orientado a objetos, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, a modelação, análise e dimensionamento do mais vasto conjunto de problemas de engenharia de estruturas (SAP2000, 2019).

desenvolvimento de uma cobertura de múltiplos usos em região central da cidade de Belo Horizonte¹⁴⁰ em estrutura metálica. Para tanto, a estrutura projetada deveria criar elementos de conexão e permanência, abarcando múltiplos potenciais de usos, articulando os vários fluxos existentes e ampliando o potencial de apropriação do espaço.

Como produto do processo, ficou acordado que os estudantes deveriam realizar a articulação do espaço integrada à concepção estrutural, sendo apresentado juntamente com o projeto arquitetônico o relatório final da análise estrutural emitido pelo *SAP2000*,¹⁴¹ tudo conforme o estabelecido nas normas de cálculo ABNT NBR 6120 (1980) e ABNT NBR 8800 (2008). Como material didático para suporte da disciplina, foi elaborado manual com método de análise estrutural no *SAP2000* (APÊNDICE F), em que foi demonstrado o processo completo, de maneira tal que os estudantes pudessem acessar as informações quantas vezes fossem necessárias.

Engajamento

Na primeira aula foi apresentada a proposta da disciplina híbrida, em que o desenvolvimento do projeto deveria ser orientado para a *performance* estrutural. Para tanto, os estudantes deveriam simular o comportamento estático e material da estrutura em *software* de análise estrutural através de um processo iterativo. Em função da linguagem escolhida, foi determinado que o material a ser trabalhado seria o aço, e os perfis a serem utilizados deveriam ser os comercialmente disponíveis em catálogos de fornecedores locais.

Nas primeiras aulas, foi apresentado o tema de projeto, o local escolhido e os parâmetros materiais. Também foi introduzido o método

¹⁴⁰ Foi proposto mais precisamente como local de intervenção a Praça Afonso Arinos, na região central de Belo Horizonte, que funciona para a articulação de duas importantes vias, tendo um grande fluxo de pedestres e utilizada como espaço de permanência e manifestações políticas e culturais. A sua maior parte é utilizada como estacionamento (APÊNDICE E).

¹⁴¹ O *SAP2000* não trabalha com a Norma Brasileira. Desta forma, foi utilizada a norma americana AISC, por esta apresentar similaridades com a norma brasileira, o que foi esclarecido aos alunos durante o exercício de projeção e análise.

de projeto baseado em *performance* e os estudos de caso análogos de projetos em que foram desenvolvidas relações de cooperação com engenheiros estruturais por meio de ferramentas digitais, em processos de otimização e geração da forma estrutural. Após este embasamento conceitual, foi solicitado que os alunos apresentassem um estudo da implantação do projeto, delineando desta maneira os parâmetros espaciais preliminares para o desenvolvimento da modelagem no *software SAP2000*.

A modelagem nos *softwares* de análise estrutural necessita que o usuário informe ao modelo a geometria pretendida, as propriedades estruturais do material, as ações incidentes e as seções transversais dos elementos estruturais especificados, tendo uma compreensão básica de Mecânica dos Sólidos, Teoria das Estruturas e Resistência dos Materiais. Dessa maneira, como mencionado anteriormente, os conceitos básicos relacionados a este conteúdo de estruturas foi revisto. No entanto, no decorrer destas aulas, foi observado que todos os estudantes tinham dúvidas, e, principalmente os estudantes que estavam no final do curso, alegavam constantemente que “não sabiam nada de estruturas” e que consideravam a disciplina “como a última chance de aprender alguma coisa”.

As aulas de nivelamento consistiram de uma abordagem teórica e prática, em que primeiro os conceitos eram apresentados por meio de aula expositiva, e, na segunda parte, os alunos desenvolviam exercícios de aplicação simplificados, exercitando a aplicação dos conceitos apreendidos no uso do *software*. O conceito de concepção estrutural, baseado na definição de Rebello (2000) foi sistematicamente explorado para a revisão do conteúdo, sendo as aulas divididas em 4 parâmetros fundamentais: geometria, ações, propriedade do material e pré-dimensionamento das seções transversais (FIG. 41). Os conteúdos de estruturas, ao serem reorganizados dessa forma, possibilitaram que os

estudantes compreendessem melhor o propósito de cada um deles, e como esses fazem parte de um conjunto sistemático de conceitos o entendimento da relação entre a solicitação da estrutura¹⁴² e a quantidade de material empregado.

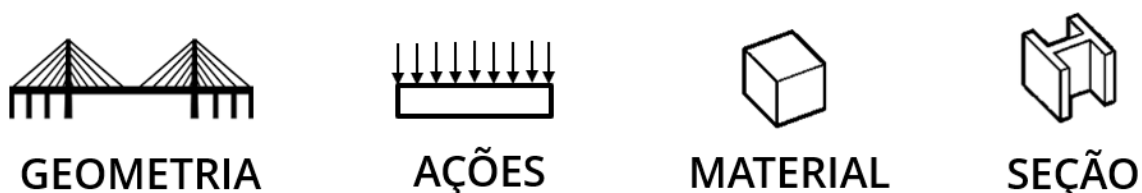


FIGURA 41 - Parâmetros para a concepção estrutural
Fonte: elaboração da autora

A aula sobre geometria abordou conceitos relativos à forma e resistência, procurando demonstrar como elementos estruturais poderiam se associar para formar sistemas estruturais, e como a geometria formada poderia influenciar na sua estabilidade devido às cargas que o solicitam. Nessa aula foram discutidos alguns princípios de projeto arquitetônico e espacialidade. Como exercício prático, os alunos foram instruídos a realizarem modelagem geométrica da estrutura no *SAP2000*, ou, em como deveriam configurar o modelo realizado em outros *softwares* de representação para sua importação para o ambiente do programa.

Na aula de propriedades dos materiais, primeiro foram exibidos projetos arquitetônicos¹⁴³ em que a escolha dos materiais serviu como parâmetro central para a síntese projetual. Em seguida, foram abordados conceitos estruturais relacionados à Resistência dos

¹⁴² A solicitação da estrutura é um termo advindo da Mecânica dos Sólidos e da Resistência dos Materiais, e é decorrente dos esforços solicitantes, ou seja, dos esforços (força normal, força cortante e momento fletor e torçor) que tendem a resistir às ações que incidem sobre a estrutura.

¹⁴³ Foram apresentados e discutidos os projetos Tree-Structure Canopy de Asterios Agkathidis (Frankfurt, Alemanha, 2011), Bosque de la esperanza de Giancarlo Mazzanti (Medellín, Colômbia, 2012), Reptilia de Tetralux Arquitectos (Santiago, 2014), Plaza del Camisón de Federico García Barba (Tenerife, Espanha, 2002), Community Center de Temme Obermeier (Unterföhring, Alemanha, 2010), Glass Pavilion de Moneo Brock (Cuenca, Espanha, 2010), e, Espacios de Paz de Colectivos de Arquitectura (Caracas, Venezuela, 2014).

Materiais tais como módulo de elasticidade, dilatação térmica, tensões de escoamento e ruptura, além do conceito de tensão de ruptura e tensão de escoamento.

A aula de seções transversais abordou questões relativas à industrialização e racionalização construtiva, tendo sido realizada uma reflexão sobre como as especificações materiais desenham o processo construtivo e impactam nas relações desenvolvidas no canteiro. Foi abordada a relação entre esforços atuantes e seções transversais para que os estudantes compreendessem a relação entre geometria da seção e os tipos de esforços resistentes, e em quais configurações elas são mais eficientes, tendo sido realizadas simulações no *SAP2000* por meio de exercícios de teste com seções de vigas, pórticos e treliças.

Nas aulas de ações, foram trabalhados conceitos relativos à análise estrutural, em que foram revisados os conceitos de força (compressão, tração, cortante, momento fletor, momento torçor) e as tensões decorrentes na estrutura (compressão, flambagem, tração, cisalhamento, flexão e torção). Para fixação dos conceitos foram propostos pequenos exercícios para cálculo de vigas, pórticos (FIG.42) e treliças, nos quais os estudantes deveriam obter, em sua análise no *software*, resultados numéricos semelhantes aos resultados numéricos obtidos pelo método analítico.

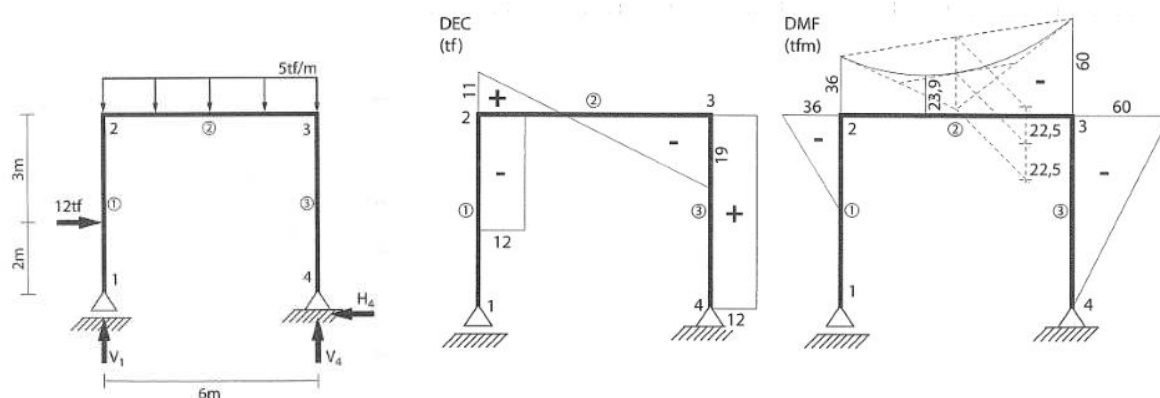


FIGURA 42 - Exercício proposto para cálculo de pórtico
Fonte: ALMEIDA, 2009

Na segunda aula sobre ações, foram abordados os tipos de carregamento (peso próprio, carga permanente, carga acidental e vento) para o desenvolvimento da análise estrutural e como essas deveriam ser configuradas no *SAP2000*. Também foi abordado um conteúdo avançado, lecionado somente na graduação e na pós-graduação em Engenharia Civil, por meio do qual os estudantes aprenderam sobre combinação dos carregamentos (FAKURY *et al.*, 2016) para verificação de Estado Limite de Serviço¹⁴⁴ e Estado Limite Último¹⁴⁵. Embora tenha havido receio em abordar um conteúdo avançado de análise estrutural, o que foi observado é que os estudantes não tiveram maiores dificuldades para compreendê-lo. Para finalizar, a última aula expositiva ensinou como os extrair os resultados da análise estrutural no *SAP2000* e quais dados seriam relevantes para a validação da estrutura proposta.

Para a banca intermediária de avaliação dos trabalhos, foi convidado um engenheiro e professor de estruturas especialista em Estruturas

¹⁴⁴ De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), o Estado Limite de Serviço são os critérios de segurança que estão relacionados ao conforto para os usuários, durabilidade da estrutura, aparência e boa utilização de um modo geral. No Estado Limite de Serviço podem ocorrer formação e abertura de fissuras, vibrações e deformações excessivas.

¹⁴⁵ De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), o Estado Limite Último está relacionado ao colapso, ou ao estado no qual a estrutura já não pode ser utilizada por razão de perda de equilíbrio e esgotamento da capacidade comprometendo a segurança da estrutura.

Metálicas¹⁴⁶ para comentar cada proposta e a análise dos dados. Essa participação e a conversa desenvolvida durante a banca motivou os estudantes a se engajarem em um processo dialógico com o engenheiro de estruturas, tendo sido demandado que essa participação fosse estendida às aulas de orientação, ampliando o que inicialmente se restringia a um modelo de conversa *homem-máquina*, para um modelo de conversa *homem-máquina-homem*. Esta conversa se estendeu até o final do curso, tendo sido fundamental para o processo de ação e (trans)ação conforme veremos a seguir.

Ação e (Trans)ação As propostas concebidas pelos alunos foram bastante diversas, tendo cada uma delas suscitado diferentes reflexões e graus de recursividade. O Projeto A¹⁴⁷ teve uma proposta essencialmente formalista, cujo objetivo foi desenvolver uma forma de geometria complexa que cobrisse grande parte da área, adotando como meta de desempenho a utilização de elementos estruturais de um mesmo comprimento e seção transversal, em favorecimento de uma suposta racionalidade construtiva. Para a banca intermediária, o grupo ainda não havia conseguido simular a forma, devido às estratégias de representação utilizadas com desenho no *software SketchUp* e protótipo físico construído manualmente não serem adequadas para a projeção de formas não euclidianas (FIG. 43). Após a banca intermediária, o grupo decidiu por adotar uma ferramenta digital paramétrica para estudar a geometria e tentar desenvolvê-la utilizando a meta de desempenho estabelecida. Por meio do *plugin* de desenho paramétrico *Grasshopper*, o grupo percebeu as limitações que o uso de perfis estruturais de mesmo comprimento poderia ter e optaram por abandonar essa meta

¹⁴⁶ Participação do engenheiro de estruturas Lucas Figueiredo Grilo, atualmente residente pós-doutoral do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG, possui doutorado (2018), mestrado (2015) e especialização (2013) em Engenharia de Estruturas pela UFMG e graduação em Engenharia Mecânica (2007) pela UFMG.

¹⁴⁷ Projeto A, elaborado por Isabela Martins Rezende e Lucas Duarte Martins. Após esta disciplina, um dos alunos se engajou no estudo de processos digitais paramétricos e análise estrutural, tendo me convidado para orientá-lo em seu trabalho de TCC, que foi registrado nesta tese como o Experimento 7 (*Arquitetura High-Low*).

para que a forma estrutural gerada tivesse a expressão plástica desejada (FIG. 44).

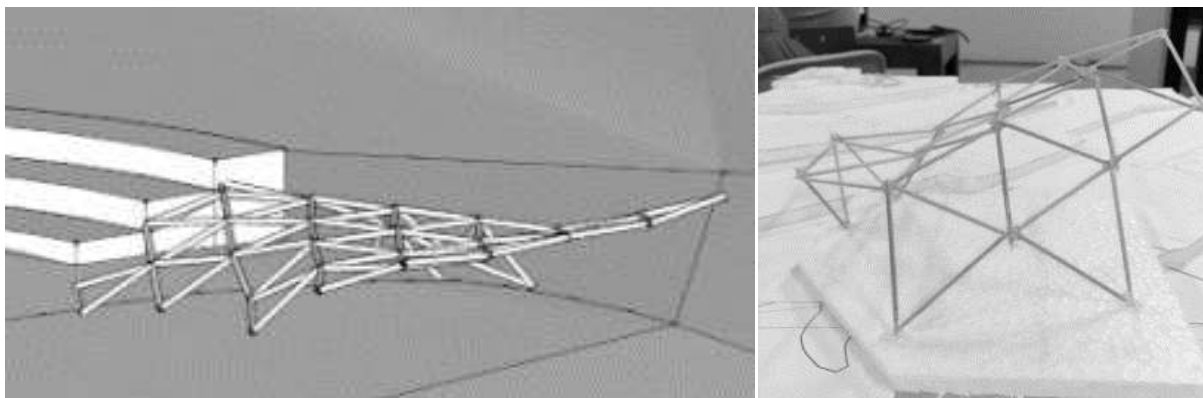


FIGURA 43 - Projeto A: Estudo da geometria por meio do *software SketchUp* (à esquerda), protótipo físico (à direita)

Fonte: Arquivo pessoal da autora

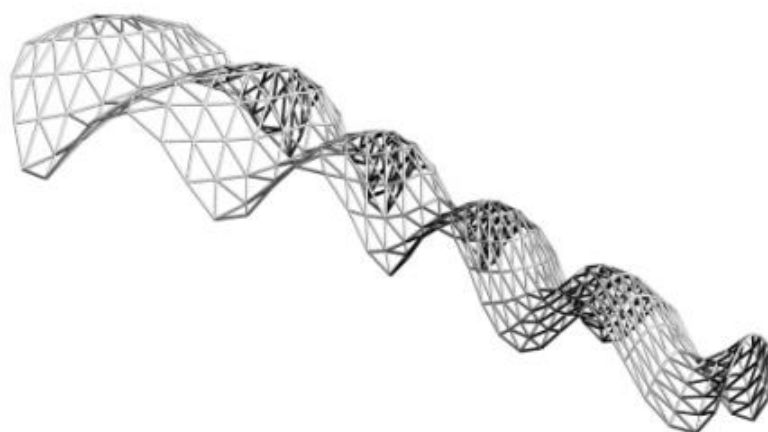


FIGURA 44 – Projeto A: Representação da geometria em ferramenta digital paramétrica

Fonte: Arquivo pessoal da autora

Após definirem a geometria, o modelo foi analisado no *SAP2000*, buscando por meio de interação e iteração com o programa, a definição dos perfis estruturais comercialmente disponíveis que seriam mais adequados para a estrutura proposta. O *SAP2000* não conseguiu sugerir perfis que viabilizassem a estrutura, tendo a maior parte deles ultrapassado o limite de segurança, o que é representado pela cor vermelha na visualização da análise (FIG. 45). Após orientação com o professor de estruturas, o grupo percebeu que a proposição de um

balanço de 11 metros tornaria a estrutura muito robusta e elevaria demasiadamente seu custo final. O balanço foi diminuído para 7 metros, o que não alteraria significativamente a proposta arquitetônica. Porém, mesmo com a alteração sugerida, a análise estrutural do *SAP2000* não validou a proposta, que continuava a ter vários perfis ultrapassando o limite de segurança. O grupo chegou à conclusão de que faltou uma definição de hierarquia para a estrutura, estabelecendo perfis primários e secundários, o que facilitaria na manipulação e análise de possíveis problemas estruturais. Também concluíram que o início do processo iterativo foi tardio, e que com mais tempo poderiam experimentar outras soluções de geometria e solucionar os problemas estruturais decorrentes.

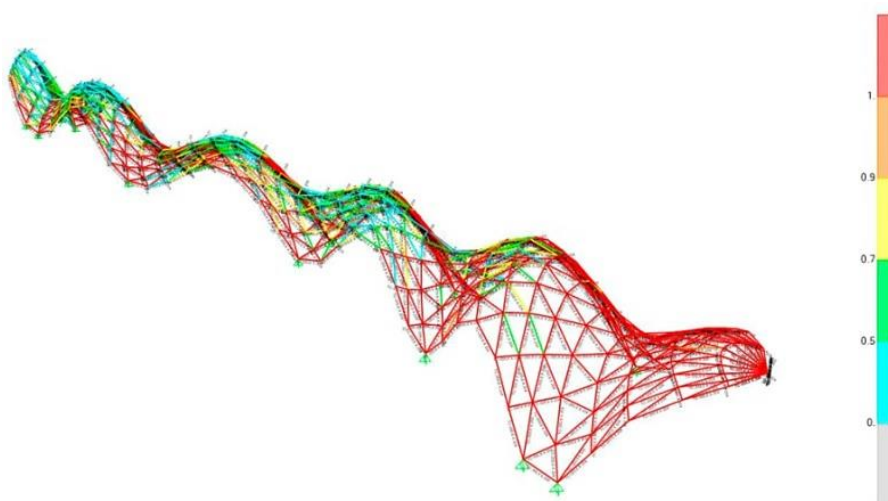


FIGURA 45 – Projeto A: análise dos perfis escolhidos no *SAP2000*
Fonte: Arquivo pessoal da autora

No Projeto B¹⁴⁸ foram desenvolvidos módulos estruturais conformados por componentes hexagonais com peças metálicas e apoios dispostos em “x” (FIG. 46). O grupo optou por fazer o desenho da estrutura diretamente no *SAP2000*, por terem tido problemas na importação do arquivo do *SketchUp*. Na análise dos perfis, o *SAP2000* validou os perfis escolhidos para a estrutura, porém ao verificar o gráfico de Momento Fletor, o grupo detectou que os perfis estavam submetidos a valores de

¹⁴⁸ Projeto B, elaborado por Aline Maracahipe Rocha, Clara Sales Ciotto e Mariana Fernandes Dias.

momento muito elevados, que comprometiam a resistência da estrutura, o que não validaria o resultado positivo encontrado na análise dos perfis.

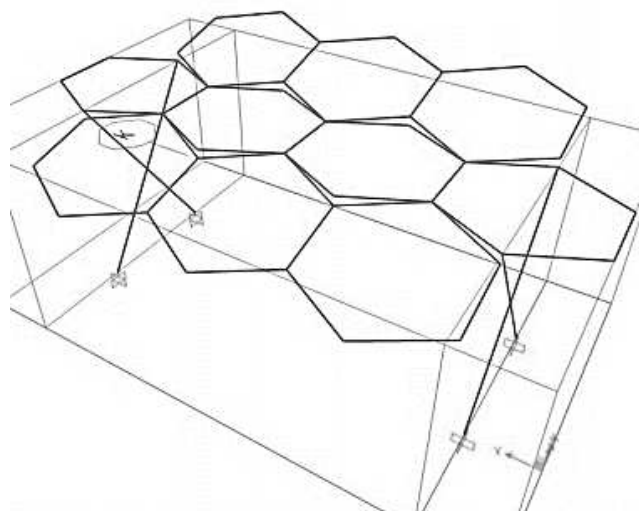


FIGURA 46 – Projeto B: proposta inicial para a estrutura
Fonte: Arquivo pessoal da autora

Na conversa com o engenheiro de estruturas, foi discutida a causa da divergência dos resultados e foi detectado que ao rotacionarem levemente os componentes hexagonais, esses não estavam conectando uns aos outros, o que levava a uma análise equivocada do *software* com relação aos perfis. Porém a análise do momento fletor acusava o problema de estabilidade estrutural causado por essa falta de conexão entre componentes. Para solucionar essa questão de estabilidade, o grupo optou por conceber a geometria da estrutura com os componentes nivelados de tal maneira que fosse facilitada a conexão entre barras. Desta forma, a estrutura poderia ser produzida em apenas três partes, sem a necessidade de ser totalmente montada no canteiro. Também foram propostas barras de travamento para absorver os esforços da cobertura, propiciando que os perfis dos componentes hexagonais fossem dimensionados com uma sessão transversal menor. Foram combinadas barras de seção quadrada e seção circular para uma melhor adaptação aos esforços.

A análise no *SAP2000* validou os perfis escolhidos com base nessas modificações geométricas. O grupo realizou novamente a análise de momento fletor e concluiu que os esforços estavam sendo transferidos para as barras de travamento, com valores mais baixos que os anteriores, distribuídos uniformemente ao longo do comprimento (FIG. 47). No entanto, a colocação das barras de travamento não foi considerada a melhor opção estética. O grupo alegou que se houvesse possibilidade de continuar o processo de projeto iriam realizar mais testes buscando conciliar a eficiência estrutural com a plasticidade desejada, de maneira que a estrutura pudesse ser validada sem a colocação das barras e com uma única sessão transversal.

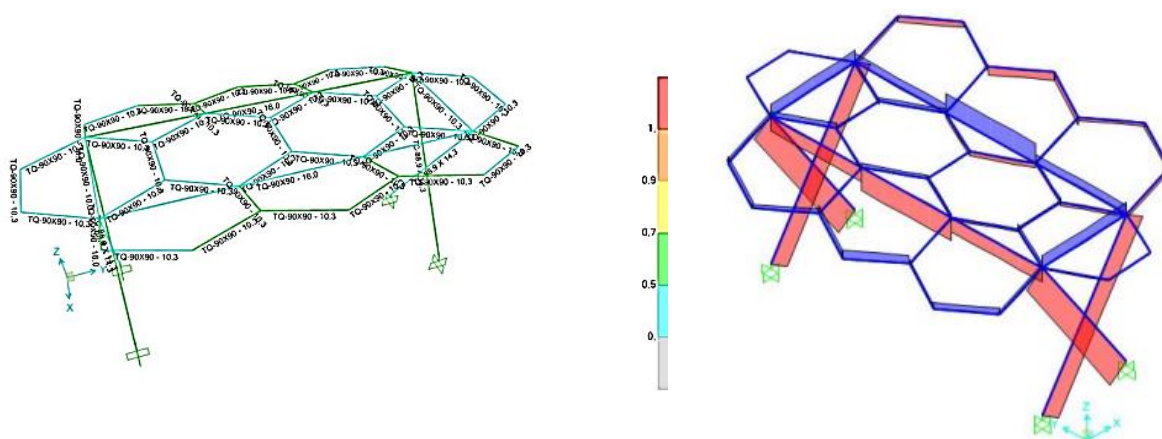


FIGURA 47 – Projeto B: análise dos perfis com as novas barras de travamento (à esquerda) e análise do diagrama de Momento Fletor (à direita)

Fonte: arquivo pessoal da autora

O Projeto C¹⁴⁹ também consistiu no desenvolvimento de um módulo autoportante, de tal maneira que quando combinado a outros, pudessem criar um espaço com diferentes ambientes, gerando gradações de sombras e permitindo diversos usos. Segundo o grupo, a forma se baseou na estrutura de uma árvore, evitando que se tornasse por demais impactante no contexto da praça. A estrutura foi trabalhada com perfis tubulares e o revestimento de cobertura proposto seria

¹⁴⁹ Projeto C, elaborado por Maria Laura de Vilhena Dias Silva e Isabela Resende Barreto.

composto por material leve, tal como chapas metálicas ou mantas de teflon.

Numa primeira análise no *SAP2000*, foi detectado um grande deslocamento no eixo Z em um dos ramos da estrutura (FIG. 48). Esse deslocamento gerou uma grande preocupação com o restante da estrutura, o que fez com que outros parâmetros fossem analisados para a detecção do problema. Para tanto, foram realizadas análises dos diagramas de momento fletor e cisalhamento, de tal maneira que esses pudessem indicar o motivo da instabilidade de um dos ramos da estrutura. Na análise do momento fletor, os estudantes perceberam que esse foi relativamente nulo em grande parte dos pontos. Já na análise do diagrama de cisalhamento, as estudantes constataram que o maior cisalhamento ocorreu nos balanços das barras que sustentavam a cobertura, sendo que as demais apresentaram um cisalhamento quase nulo. A análise dos gráficos não ofereceu maiores indícios de qual poderia ser a origem do alto valor de deslocamento encontrado, tendo sido necessário solicitar o auxílio do engenheiro de estruturas para auxiliar na análise e compreensão do problema.

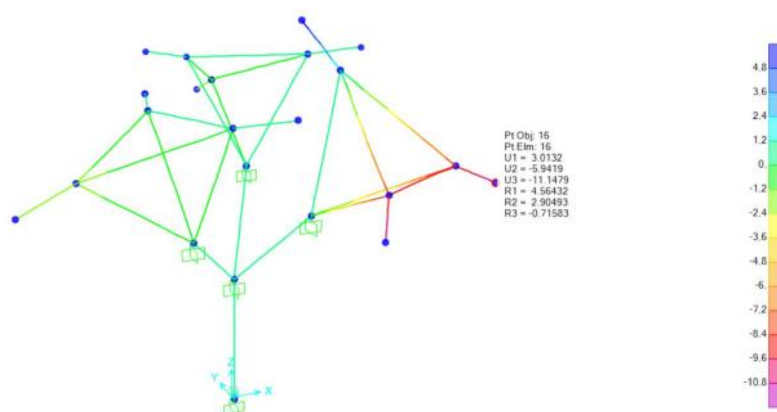


FIGURA 48 – Projeto C: deslocamento em Z
 Fonte: arquivo pessoal da autora

Com a cooperação do engenheiro de estruturas, o grupo tentou compreender a razão do alto valor de deslocamento em Z. O

engenheiro sugeriu a realização de duas novas tentativas de análise: uma modificando o ângulo do último ramo e outra com perfis menos esbeltos, o que fez com que o deslocamento em Z diminuísse consideravelmente embora não tenha chegado a um valor aceitável. O grupo não conseguiu identificar a causa/origem do erro: se foi de ordem conceitual, de manipulação do *software*, de funcionamento do próprio *software* ou se seria uma combinação desses fatores. O engenheiro de estruturas considerou que como não haviam sido constatados maiores problemas com relação ao momento fletor e ao cisalhamento, provavelmente o problema ocorreu devido a interoperabilidade entre *softwares*. No entanto, embora a estrutura final não tenha sido validada estaticamente, o grupo compreendeu o erro como parte do processo, desmistificando a ideia de que o *software* poderia ser uma ferramenta “mágica”. Os alunos consideraram que a iteração com o modelo os ajudou a desenvolverem certa sensibilidade para perceberem processualmente como solucionar um problema estrutural, buscando uma melhoria da solução proposta.

No desenvolvimento do Projeto D,¹⁵⁰ houve particular interesse em estudar o comportamento de *tensegrity*. Dentro deste princípio, o aluno desenvolveu a concepção da estrutura com elemento de pórtico simples composto por barras e cabos, rotacionando cada elemento de 15 em 15 graus. A análise do *SAP2000* buscou validar se a estrutura estava de fato se comportando dentro dos princípios do *tensegrity*, ou seja, os elementos que estavam sendo propostos como cabos estavam de fato sendo submetidos somente a esforços axiais de tração, e se os elementos de barras estariam submetidos somente a esforços de compressão. Na análise do diagrama de esforços axiais, o aluno constatou que os elementos nos quais havia a intenção de substituir por cabos, isto é, os que supostamente deveriam trabalhar à tração, estavam de fato sendo submetidos à compressão, enquanto as barras

¹⁵⁰ Projeto D, elaborado por Ricardo Yoiti Hanyu Junior.

que deveriam estar submetidas à compressão trabalhavam à tração. Além disso, para se configurar como um *tensegrity*, a estrutura não poderia apresentar valores de momento fletor, isto é, os momentos deveriam ser zero, o que não coincidiu com o resultado obtido (FIG. 49).

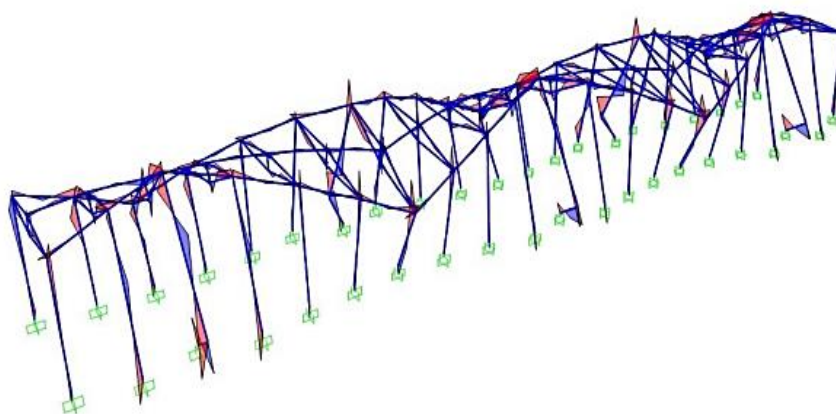


FIGURA 49 – Projeto D: diagrama de momento fletor
Fonte: arquivo pessoal da autora

Dessa maneira, a geometria da estrutura proposta não se validou como do tipo *tensegrity*, fazendo com que todos os elementos tivessem que ser especificados como barras devido à ordem dos esforços solicitantes. A conversa com o engenheiro de estruturas¹⁵¹ foi essencial para o aluno compreender os problemas de estabilidade horizontal que poderiam ser gerados por carga de vento. Após a orientação, foram calculadas no *software* Visual Ventos¹⁵² as cargas de vento incidentes, gerando dessa maneira a pior combinação possível¹⁵³ para a análise da estrutura. Mas, mesmo com a pior combinação, os perfis escolhidos ainda assim foram validados em análise do *SAP2000*.

¹⁵¹ Consideramos que esta conversa foi recursiva devido ao perfil do professor de estruturas, já que este se engajou na proposta apresentada. O perfil do professor (tanto arquiteto quanto engenheiro) que integra as disciplinas híbridas de projeto e estruturas deve ser de um entendimento tectônico do projeto arquitetônico. Alguns artigos do III Eneeee, tal como a experiência da UFPE (FREITAS, 2017) (RESENDE; VELOSO, 2017) e da UTFPR (ACHÁ *et al.*, 2017), que relatam a experiência de um ensino tectônico nas disciplinas de projetos, com a presença de professores de estruturas juntamente aos professores de projeto orientando os estudantes.

¹⁵² O carregamento encontrado no *software* Visual Ventos foi bastante aproximado, uma vez que este *software* é mais indicado para casas ou prédios retangulares.

¹⁵³ Tudo conforme Fakury *et al.* (2016).

No Projeto E,¹⁵⁴ foi desenvolvida uma geometria estrutural com barras e cobertura em lona tensionada através de protótipo físico. A proposta era proporcionar proteção solar com facilidade de estruturação e montagem. O grupo alegou que as análises de momento fletor, cisalhamento e força axial foram consideradas aceitáveis dentro da ordem de grandeza esperada, não tendo sido necessária uma recursividade no processo, uma vez que os perfis selecionados também foram validados no *SAP2000*. No entanto, o grupo não se engajou em considerar a carga de vento incidente na lona tensionada, o que poderia ter alterado substancialmente o resultado da análise.

E, por fim, o trabalho desenvolvido no Projeto F¹⁵⁵ foi particularmente interessante devido a uma sucessão de erros conceituais, mas que ao final suscitou em uma reflexão com relação a uma possível perda da noção de escala e materialidade na prática digital, tal qual é abordado por Picon (2010) quando se refere a uma crise da escala e da tectônica na projeção contemporânea por meio de ferramentas computacionais. O aluno utilizou como referência para concepção estrutural o projeto do arquiteto Frei Otto para o Aeroporto de Stuttgart na Alemanha (FIG. 50), tendo tido a intenção de realizar uma estrutura muito similar, o que, segundo o aluno, seria uma garantia de acerto com relação à estabilidade estrutural.

¹⁵⁴ Projeto E, elaborado por Larissa Guimarães Reis e Marllon Luiz Oliveira Morais.

¹⁵⁵ Projeto F, elaborado por Ângelo de Freitas Oliveira.

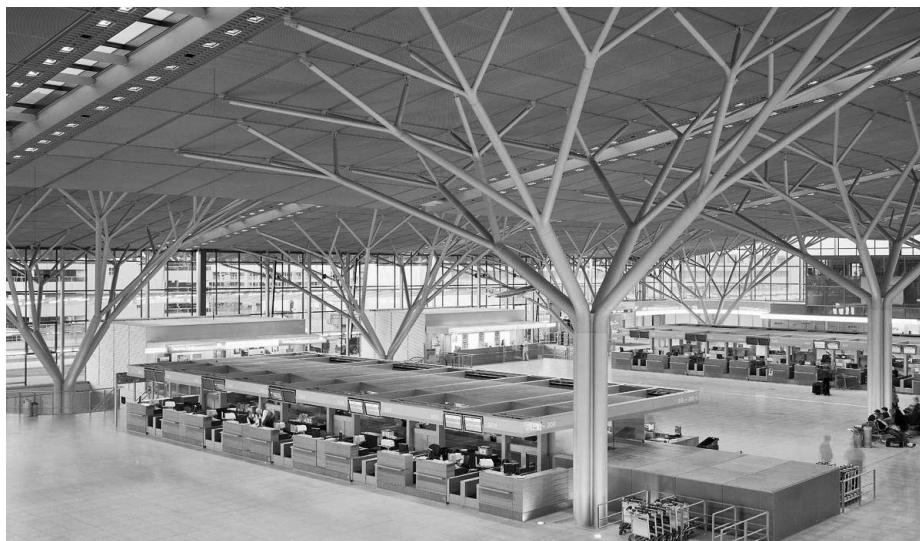


FIGURA 50 - Estrutura do Aeroporto de Stuttgart
Fonte: GMP ARCHITEKTEN, 2019.

O aluno desenhou a estrutura diretamente no *software* buscando repetir o mesmo padrão da estrutura análoga de Frei Otto. No entanto, a geometria desenhada não se validou, e, após a primeira análise estrutural, o aluno afirmou ter se mostrado bastante surpreso com o resultado, iniciando desta maneira um processo de investigação para a compreensão dos problemas relativos à definição dos parâmetros da estrutura que poderiam ter ocasionado a sua falta de estabilidade e resistência. Na orientação com o engenheiro de estruturas, ao constatar valores de momento fletor e deslocamento tão altos, o engenheiro perguntou ao aluno qual seria a dimensão da estrutura projetada. Ao constatar que a estrutura teria 8 x 8 m, com aproximadamente 10 m de altura, e estaria sustentada por um único pilar com $\frac{1}{4}$ da altura total da estrutura, ficou claro que se tratava de um problema de percepção de escala. Para a banca final, o aluno refez a geometria da estrutura, revisando as proporções por meio do aumento da quantidade de pilares e da diminuição do comprimento das barras de vigas. Com esta revisão da geometria, o momento fletor máximo e o cisalhamento máximo apresentaram valores relativamente baixos, tendo os perfis sido validados na análise do *software* (FIG. 51).

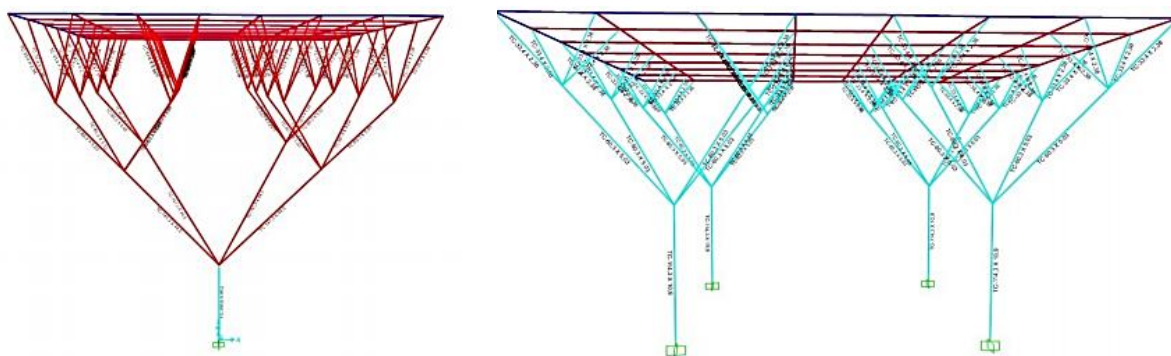


FIGURA 51 – Projeto F: validação de perfis no *SAP2000* da primeira proposta (à esquerda) e da segunda proposta (à direita)

Fonte: arquivo pessoal da autora

Nessa experiência, o grupo iniciou o trabalho fazendo alusão à forma geométrica desenvolvida por Frei Otto com base nas imagens consultadas e sem se preocupar em analisar o processo projetual desenvolvido pelo arquiteto alemão, em cujo caso a estrutura havia sido concebida por meio de processo do tipo *form-finding* analógico. Ao realizar a análise estrutural, o grupo se mostrou perplexo com relação à forma reproduzida “não ter funcionado estruturalmente”. Curiosamente, ao buscar uma forma referente que pudesse ser validada estruturalmente, o grupo acabou se aproximando mais da geometria do projeto desenvolvido para o Aeroporto de Stuttgart, percebendo assim que ao tentar reproduzir plasticamente a forma da estrutura, não haviam analisado corretamente as proporções geométricas da imagem.

REFLEXÃO-NA-AÇÃO:

Objetivos

Em decorrência de o enfoque da disciplina ter sido redirecionado para o nivelamento da turma com relação à aprendizagem dos conceitos relacionados à concepção estrutural e aprendizagem do *software*, o processo de projeção se constituiu como um procedimento de experimentação com forma e desempenho, em que os projetos

desenvolvidos se constituíram apenas enquanto um exercício de prática da ferramenta computacional. A articulação do espaço no processo de projeto ficou subjacente, tendo a maioria das propostas sido desenvolvidas como um exercício projetual de concepção estrutural de pequena escala, quase da ordem de mobiliário urbano, sem maior conexão com o contexto urbano em que foi proposta sua inserção.

Processo

Ao final da disciplina foi aplicado questionários para avaliação do processo (APÊNDICE G), e foi realizada uma roda de conversa para exposição de críticas e sugestões. Nesse processo de avaliação da disciplina, os estudantes afirmaram já terem tido contato com os conceitos abordados, mas salientaram que a abordagem realizada na disciplina foi didaticamente mais adequada para os estudantes de arquitetura, propiciando que os conceitos fossem aplicados ao desenvolvimento de projeto. A abordagem do conceito de concepção estrutural dividida em 4 etapas (geometria, material, ações e seção transversal), por meio de aulas teóricas e práticas, auxiliou os estudantes a vislumbrarem a aplicação dos conceitos matemáticos abstratos para uma orientação material do processo de projeto.

Os recursos visuais apresentados pelo *software* permitiram a simulação do comportamento das estruturas, levando a um reconhecimento dos conceitos apreendidos através de modelos matemáticos analíticos que, por serem demasiadamente abstratos, não foram bem compreendidos. A abordagem propiciou que os estudantes se sentissem confiantes para estabelecer um diálogo com o engenheiro de estruturas abordando questões avançadas relacionadas ao comportamento estrutural e às possibilidades construtivas. Esse processo estimulou alguns alunos a retomarem os estudos do conteúdo das disciplinas de estruturas que já haviam cursado, tendo alguns até retornado como ouvintes às aulas de disciplinas como Resistência dos Materiais, como forma de auxiliá-los em uma melhor compreensão e interpretação dos resultados de análise

estrutural obtido por meio do *software*. A experiência, ao possibilitar um acesso ao código técnico da prática da análise estrutural, fez com que os estudantes passassem a entender e conferir sentido ao conteúdo das disciplinas de estruturas.

Alguns estudantes sugeriram que, para as futuras disciplinas, o processo de simulação computacional servisse para orientar a confecção de protótipo na escala 1:1, como uma forma de compreender as relações entre simulação da forma, construção e uso. Este exercício projetual poderia ter como tema o desenvolvimento de estruturas menores construídas em terraços na própria escola, com a possibilidade de trabalhar a fabricação digital numa lógica inversa, onde primeiro seriam desenvolvidas peças de ligação, e, posteriormente, seriam desenvolvidas estruturas menores utilizando estas peças, testando sua estabilidade no *software* de análise estrutural. Essa proposta foi desenvolvida no experimento 4 (*Oficina de Formas Ativas*), que veremos adiante.

Linguagem

O uso do *SAP2000* propiciou a aprendizagem de conceitos estruturais por meio de aplicação prática e visualização, mas a transposição de informações entre *softwares* CAD dificultou a recursividade. Os grupos que optaram por realizar a modelagem da geometria no *AutoCad* ou no *SketchUp* tiveram problemas de interoperabilidade entre os *softwares*, havendo dessa maneira perda de informação do modelo, o que pode inviabilizar o processo.

Com relação à proposta do modelo de conversa *homem-máquina*, essa se mostrou eficiente para a aprendizagem de conceitos, mas parcialmente eficiente para o engajamento com o processo de projeto, tendo sido demandada a inclusão do engenheiro de estruturas para cooperar com a interpretação dos resultados e com a correção dos erros cometidos. A possibilidade de conversa *homem-máquina*

considera, de acordo com Pask (1976b), um formato de conversação em que humanos, máquinas e ambientes se engajam em trocas colaborativas ou cooperativas. Dessa maneira, consideramos inicialmente a ferramenta digital como um agente para a realização de uma prática dialógica, já que esta seria capaz de receber informação e processá-la, dando as respostas necessárias.

Nicholas Negroponte (2011) enfatizou que esse diálogo *homem-máquina* funciona apenas por meio de trocas recursivas, cujo processo de projeto pode se efetivar por meio de três possibilidades: a primeira trata-se de uma automatização dos procedimentos atuais tendo em vista aumentar a produtividade e reduzir os custos das práticas existentes; a segunda se refere a uma alteração visando a um ajuste às ferramentas de projeto e produção; e a terceira se constitui de uma proposta evolutiva, com a introdução de um mecanismo que irá propiciar o desenvolvimento de uma nova abordagem. Negroponte (2011) considera que para a prática de projeção arquitetônica, somente interessa o desenvolvimento da terceira abordagem, em que a máquina poderia seguir o método do arquiteto, mas ao mesmo tempo seria capaz de discernir e assimilar as idiossincrasias conversacionais. No entanto, Negroponte (2011) considera que, a inteligência é um comportamento particularmente difícil de imitar nas máquinas devido à sua imbricação com o contexto (tempo, localidade, cultura, etc) e da necessidade de discernir as mudanças de significado. Dessa forma, a demanda dos alunos para que fosse incluída a participação do engenheiro de estruturas no processo de projeção foi essencial para o desenvolvimento da tese, uma vez que demonstrou os limites da máquina para que a interação proposta se tornasse efetivamente uma conversa dialética entre agentes.

Para Dubberly e Pangaro (2015a), a conversa entre homens é fundamental para a compreensão dos princípios de dualidade, complementaridade e conservação da informação, de tal forma que não haja perda de conceitos no desenvolvimento de um ambiente único para as disciplinas de projeto e estruturas. No entanto, a expansão da conversa para *homem-máquina-homem* aumentou a complexidade por meio das múltiplas interações propiciadas, criando um sistema com subjetividades, valores e responsabilidades explícitas, demandando do professor de projetos a responsabilidade pela manutenção do acordo, engajamento e coerência do sistema no processo de conversação, o que, para Pask (1980), é assegurado pela linguagem e meios comuns.

Assim, a conversa *homem-máquina-homem* se torna mais complexa, podendo reproduzir, caso não seja mantida a coerência do sistema, as relações de monólogo. A participação do engenheiro no ambiente de ensino de projetos pode reproduzir a construção social existente na prática profissional, estando dessa maneira submetida às mesmas relações de poder que vimos anteriormente. Sendo assim, o círculo resultante dessa interação requer uma percepção acerca das questões simbólicas entre os participantes, podendo se realizar em um processo virtuoso, em que a conversa dialética acontece, ou vicioso, em que serão reproduzidas relações de monólogo e seus conflitos decorrentes, o que exige um processo de reflexão mais amplo para a construção do modelo.

Meios

A experimentação com a linguagem computacional se mostrou eficiente com relação à aprendizagem dos conceitos estruturais de uma forma visual e interativa. No entanto, o fato de a modelagem da proposta arquitetônica não ter sido realizada no mesmo ambiente do modelo estrutural gerou dificuldade com a circularidade e recursividade do processo, tendo ainda ocorrido problemas relacionados à

interoperabilidade. Essas questões relativas à escolha do *software* nos estimularam a considerar outras ferramentas computacionais, de tal maneira a integrar melhor a análise estrutural com a projeção arquitetônica.

O processo propiciou a aprendizagem de uma linguagem comum com o engenheiro de estruturas, mais próxima da prática profissional vigente, o que se mostrou eficiente para estimular o diálogo pretendido entre arquitetos e engenheiros. No entanto, foi percebido que o uso da linguagem computacional por si só não estimula o desenvolvimento de projetos orientados para a *performance*, tendo a disciplina sido orientada mais para a aprendizagem dos aspectos estruturais e menos para o projeto, indicando para os futuros experimentos uma maior preocupação em desenvolver uma abordagem em que houvesse um maior equilíbrio entre a discussão da articulação do espaço e o desenvolvimento da estrutura.

A demanda dos alunos pela materialização dos protótipos em escala 1:1 gerou uma reflexão importante sobre a possibilidade de expansão do processo de projeto orientado para a simulação da *performance*, para o desenvolvimento de processo orientado para a tectônica, incluindo a construção e o uso como parâmetros a serem estimados na articulação do espaço.

3.2.3 EXPERIMENTO 3: *Open Building e Form-finding estrutural*

CONHECER-NA-AÇÃO:

<i>Contexto</i>	Módulo de concepção do projeto da disciplina OFIAUP Parcelamento e Assentamentos Habitacionais para o desenvolvimento de assentamentos habitacionais populares (APÊNDICE H), oferecido para o curso noturno de Arquitetura e Urbanismo da UFMG no 1º semestre de 2018, com a participação de dois professores de projeto, sendo 11 alunos matriculados.
<i>Linguagem</i>	Conversa <i>homem-máquina</i> utilizando método computacional (<i>software</i> paramétrico <i>Grasshopper</i> e <i>plugin</i> de análise estrutural <i>Scan&Solve</i> para processo de <i>form-finding</i>).
<i>Acordo</i>	Desenvolver exercício de projeto para edifício habitacional em nível de estudo preliminar, com ênfase em flexibilidade espacial e estrutural, de tal maneira que a proposição da volumetria dos edifícios na quadra propiciasse que o edifício funcionasse como um articulador da relação habitação-cidade. Dessa maneira, o projeto para habitação deveria ser desenvolvido baseado no conceito de <i>Open Building</i> ¹⁵⁶ e na Teoria dos Suportes de Habraken (1972) ¹⁵⁷ , enfatizando o lado social da

¹⁵⁶ *Open Building* consiste em uma abordagem de projeção baseada nos conceitos de Habraken (1972), em que os preceitos de projeto determinam que o projeto é compreendido como um processo que inclui os usuários em suas decisões, compreendendo que o ambiente construído está em constante transformação e que as suas mudanças devem ser reconhecidas e entendidas.

¹⁵⁷ *Supports: an alternative to mass housing* (1972) é uma publicação na qual Habraken expõe suas críticas em relação aos papéis do arquiteto e dos profissionais da construção no enfrentamento da questão habitacional, em que propõe que as habitações não sejam entendidas como produtos ou objetos manufaturados, mas como uma estrutura de suporte. Toda construção que permita a provisão de uma moradia passível de execução, alteração ou demolição, independentemente das outras moradias, é uma estrutura de suporte, não devendo esta ser confundida com um esqueleto de edifício. Para Habraken, quanto maior a variedade de possibilidades de moradias em um suporte, melhor. A Teoria dos Suportes estabelece que a edificação seja constituída por suporte e recheio. O suporte se caracteriza pela condição dada ao usuário para que ele ocupe uma unidade habitacional, responsabilidade coletiva, sistema estrutural independente e infraestrutura (abastecimento de água e energia, esgotamento sanitário, telefonia, circulação e segurança, lixo e saídas de emergência). Já o recheio é tudo aquilo que o usuário precisa para ocupar definitivamente a unidade habitacional, e é de responsabilidade individual de cada morador (divisórias, esquadrias, forro, pisos, arranjo dos cômodos, pontos

construção de habitações, considerando que essa constitui-se como um processo social e uma questão técnica e organizacional. No âmbito das bases de projeção de Habraken (1972), o processo de projeto deveria permitir que os múltiplos participantes (profissionais e usuários) tomassem decisões espaciais e construtivas, considerando que a projeção da interface entre os diferentes sistemas permitisse a troca de um sistema construtivo por outro que desempenhasse as mesmas funções, reconhecendo que o ambiente construído estaria em constante transformação.

Engajamento

Para o desenvolvimento da proposta de projeto foi explorado o conceito de *Open Building* por meio da exposição da teoria e do estudo do projeto *Next 21*,¹⁵⁸ (FIG. 52), construído em 1993 em Osaka, que consistiu em um experimento para habitação dentro dos preceitos de Habraken (1972). Na análise desse projeto, os alunos foram convidados a debaterem criticamente a abordagem, de maneira a promover uma reflexão sobre o papel que o arquiteto deve exercer nesse tipo de proposta e como as ferramentas digitais poderiam auxiliar esse tipo de prática. Essa reflexão teve como objetivo apresentar as possibilidades da modelagem paramétrica e dos procedimentos de *form-finding*. Dessa maneira, foi proposto para os alunos projetarem a volumetria das edificações a partir dos parâmetros urbanísticos de ocupação da quadra, em que a infraestrutura deveria conter definições de suporte tais como os espaços de domínio público, os espaços de domínio privado e os espaços intermediários entre a cidade e a habitação, propiciando uma flexibilidade do espaço para a ocupação dos usuários. Para obtenção dessa flexibilidade, foi proposta a realização de processo de *form-finding* por meio da análise de tensões em *software* computacional.

das instalações).

¹⁵⁸ O *Next 21* é um projeto experimental de habitação baseado na abordagem do *Open Building* realizado em Osaka, Japão, cuja obra do edifício foi concluída em 1994. O projeto que abriga 18 unidades habitacionais permite um alto grau de flexibilidade para organização do espaço, permitindo inclusive a reconfiguração da fachada.



FIGURA 52 - Projeto *Next 21*, Osaka, 1993
Fonte: MORAIS, 2018.

O processo de *form-finding* integrado ao procedimento de análise de tensões foi apresentado conceitualmente pela diferenciação entre as abordagens tipológicas e topológicas (SCHUMACHER; ZHENG, 2017) para a concepção estrutural, visando a engajar os alunos em um raciocínio topológico, e, na prática, por meio de aulas para aprendizagem do *software* paramétrico *Grasshopper* e do *plug-in* de análise estrutural *Scan&Solve*.

A tipologia estrutural refere-se à engenharia estrutural moderna clássica,¹⁵⁹ que decompõe qualquer estrutura em um subsistema estrutural independente (FIG. 53, à esquerda). Cada subsistema de pilares, vigas, lajes, arcos, abóbadas etc., é composto por elementos

¹⁵⁹ Essa abordagem é realizada por Patrick Schumacher em defesa de como as técnicas de otimização desenvolvidas pela engenharia contemporânea podem corroborar a estética do “estilo parametricista”, em que a estrutura é também um elemento arquitetônico de formas fluidas, em oposição à abordagem modernista desenvolvida por Le Corbusier, em que o sistema estrutural é desenvolvido como um sistema independente utilizando elementos geométricos reticulados, cujos elementos são distribuídos uniformemente, conformados por um exoesqueleto estrutural e um sistema estrutural interno, cuja função é estabilizar a estrutura.

que atendem a uma configuração de carregamentos, apoios e forças, e, cada elemento vai sendo caracterizado de uma forma mais particular (viga vierendel, treliça, viga caixa etc.).

Na abordagem da análise estrutural topológica realizada por Schumacher e Zheng (2017), a estrutura é analisada em sua superfície, não em elementos distintos como na análise tipológica, em que, por meio da análise de tensões, é possível capturar o arranjo de forças no todo, propiciando visualizar a relação entre os parâmetros geométricos, os esforços solicitantes e a resistência estrutural. Para Schumacher e Zheng (2017), a engenharia estrutural moderna é incapaz de diferenciar os elementos estruturais de uma torre ao longo de seu eixo vertical, seja variando gradualmente o padrão dentro de um dado sistema (Fig 53, à esquerda) ou misturando diferentes sistemas concentrando mais material estrutural na base, e diminuindo gradativamente os elementos em direção ao topo (FIG. 53, à direita). A possibilidade dessas diferenciações permitidas por técnicas computacionais de otimização estrutural em *softwares* baseados no Método dos Elementos Finitos, expõe uma relativa irracionalidade ou ineficiência estrutural do raciocínio tipológico calcado em uma racionalidade estrutural moderna.

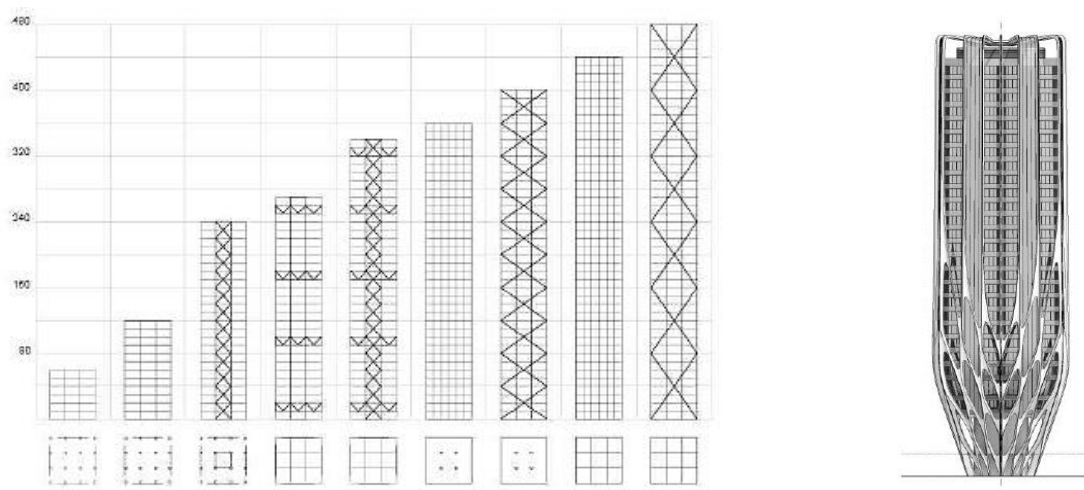


FIGURA 53 - Raciocínio tipológico x raciocínio topológico para a concepção estrutural
Fonte: SCHUMACHER; ZHENG, 2017.

A associação das técnicas de otimização topológica para concepção estrutural com o processo de projeto paramétrico proposto neste experimento não foi uma abordagem orientada para o desenvolvimento de uma estética estilística “parametricista”, mas como um exercício para que os alunos desenvolvessem a percepção da relação causal entre forma e resistência por meio de análise estrutural topológica, percebendo como os parâmetros de articulação do espaço podem impactar na quantidade de material a ser utilizado na estrutura. Dessa maneira, a proposição do desenvolvimento de modelagem paramétrica visou à geração de um processo circular e recursivo, em que a síntese do projeto da edificação resultaria da negociação entre parâmetros urbanísticos de ocupação da quadra e parâmetros materiais e construtivos, derivados do processo de *form-finding*. Nesta abordagem seria possível encontrar a quantidade mínima de material para a sustentação do edifício, de tal forma que esta quantidade de material estrutural pudesse ser distribuída de acordo com a articulação do espaço, não estando restrita ao raciocínio tipológico de estruturas reticuladas.

Como procedimento de análise topológica para aplicação em processo de *form finding* estrutural na concepção do edifício tendo como objetivo um estudo do comportamento material orientado para o pré-dimensionamento, exploramos o processo de otimização topológica que consiste em considerar como essenciais para a estrutura as regiões com altos níveis de tensão, e, remover material das regiões com baixos níveis de tensão (FIG. 54). O resultado deste processo pode levar à geração de exoesqueletos estruturais ou ser convertido em um pré-dimensionamento de um subsistema estrutural por meio de relação matemática. Esta relação consiste em realizar a análise de tensões do volume do edifício pretendido com as ações aplicadas na sua superfície, gerando, dessa maneira, como resultado da análise, a espessura mínima por meio da máxima tensão encontrada, podendo essa ser

convertida para uma área mínima de seção transversal de pilar,¹⁶⁰ a ser distribuído de acordo com a articulação do espaço.

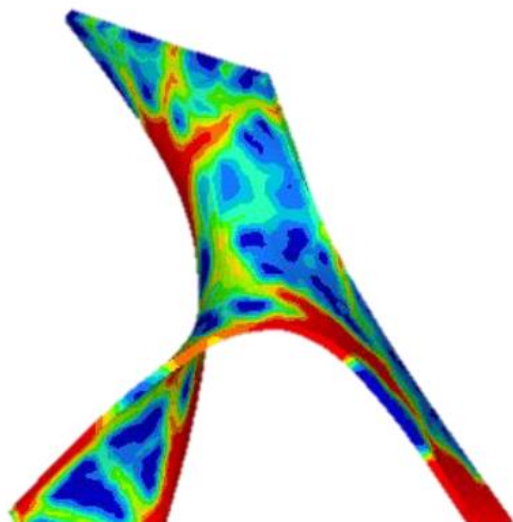


FIGURA 54 - Concepção estrutural por meio de técnica de otimização topológica realizado pelo Zaha Hadid Architect's CODE group

Fonte: SCHUMACHER; ZHENG, 2017.

Para a realização desse procedimento de *form-finding* estrutural por meio da análise de tensões (BORGES, 2015), foram abordados os conceitos de módulo de elasticidade do material (E), resistência ao escoamento (F_y) e resistência à ruptura (F_u), todos esses relacionados à disciplina de Resistência dos Materiais. Para embasar a escolha do material, os conceitos relativos às propriedades do material foram abordados não só quantitativamente, mas também qualitativamente, tendo como enfoque os critérios de seleção por meio de um comparativo entre a relação dos materiais com os esforços solicitantes, as seções transversais e os parâmetros construtivos (disponibilidade, mão de obra, relações no canteiro, sustentabilidade, etc.).

¹⁶⁰ O procedimento de cálculo utilizado foi o mesmo desenvolvido na dissertação de mestrado desta autora em BORGES (2015). Para a aplicação do método para a concepção do edifício, foi realizada conversa com o Prof. Ricardo Fakury para verificar as suas implicações e como poderia ser incluída a consideração da flambagem à compressão no cálculo do pré-dimensionamento. Para a consideração da flambagem de uma forma genérica, fomos orientados a multiplicar os valores de tensões encontrados por 1,4, o que aumenta a área das seções transversais encontradas, e conseqüentemente, diminui a esbelteza dos perfis. O critério de falha utilizado foi a tensão de escoamento. Para maior conhecimento do método desenvolvido, ver Borges *et al.* (2016), ver APÊNDICE A.

O processo paramétrico e *form finding* por meio de um raciocínio topológico tem o potencial de integrar a análise do comportamento do material com os parâmetros arquitetônicos de maneira holística, fazendo com que os alunos percebessem uma relação causal entre forma e resistência. A proposição desse procedimento permeado pelo conceito de *Open Building* buscou que os alunos se engajassem criticamente no pré-dimensionamento da estrutura, compreendendo que não se tratava apenas de uma decisão técnica, mas que envolvia também uma negociação de parâmetros de forma e resistência com aspectos sociais de articulação do espaço (FIG. 55).

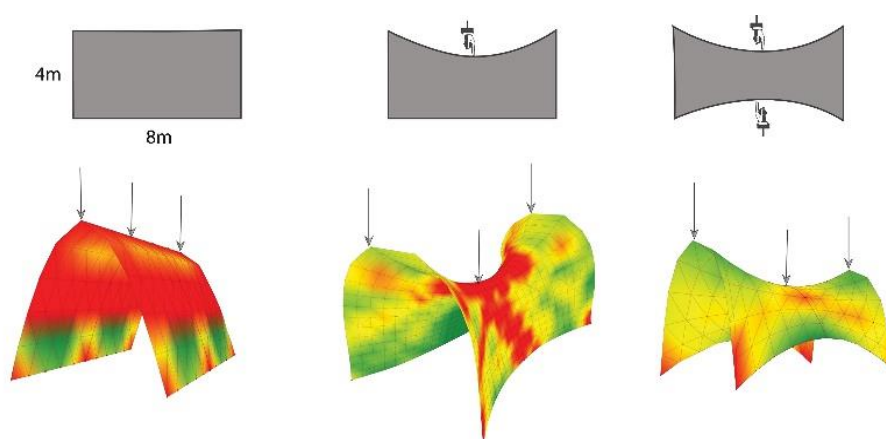


FIGURA 55 - Exemplo de negociação de parâmetros
Fonte: IACC, 2014.

Ação e (Trans)ação Os alunos conceberam o edifício partindo da volumetria gerada pelo desenho e pelos parâmetros de ocupação da quadra (realizados na etapa de desenho urbano da disciplina), em que o volume resultante foi submetido à análise de tensões pelo *software Scan&Solve*, tendo posteriormente sido realizado procedimento para realizar o pré-dimensionamento estrutural. No entanto, a partir dessa etapa instrumental, percebemos uma derivação das abordagens para conciliar os parâmetros materiais com a articulação do espaço. Essas abordagens consistiram em três caminhos predominantes, sendo o primeiro uma reprodução da abordagem tipológica, utilizando a ferramenta de

análise de tensões para o pré-dimensionamento e concepção de estrutura em grelha; o segundo, na orientação do processo de projeto para o material; e, o terceiro, no desenvolvimento do raciocínio topológico proposto, tendo havido uma integração dos aspectos técnicos da concepção estrutural com a abordagem social de articulação do espaço. A primeira abordagem foi desenvolvida por 8 alunos dos 11 (onze) matriculados, estando 4 (quatro) destes alunos no 2º período, 3 (três) no 6º período e 1 (um) no 9º período, sendo todos alunos regulares do curso noturno. A segunda proposta foi desenvolvida por apenas uma aluna, estando matriculada no 2º período do curso noturno. A terceira abordagem foi desenvolvida por 2 (dois) alunos do curso diurno, matriculados no 9º e no 10º período, já tendo cursado todas as disciplinas de estruturas do currículo regular.

As propostas tipológicas partiram de uma definição das áreas públicas, privadas, de circulação e das áreas verdes. Posteriormente, os alunos simularam algumas possibilidades de ocupação, realizando a distribuição dos pilares de tal maneira que não gerassem conflito com as simulações de articulação do espaço já realizadas. Nessa abordagem, não houve engajamento para a realização de um processo circular e recursivo de negociação de parâmetros, tendo a análise de tensões sido realizada como um procedimento similar ao método de pré-dimensionamento pelo cálculo de área de influência (FIG. 56).

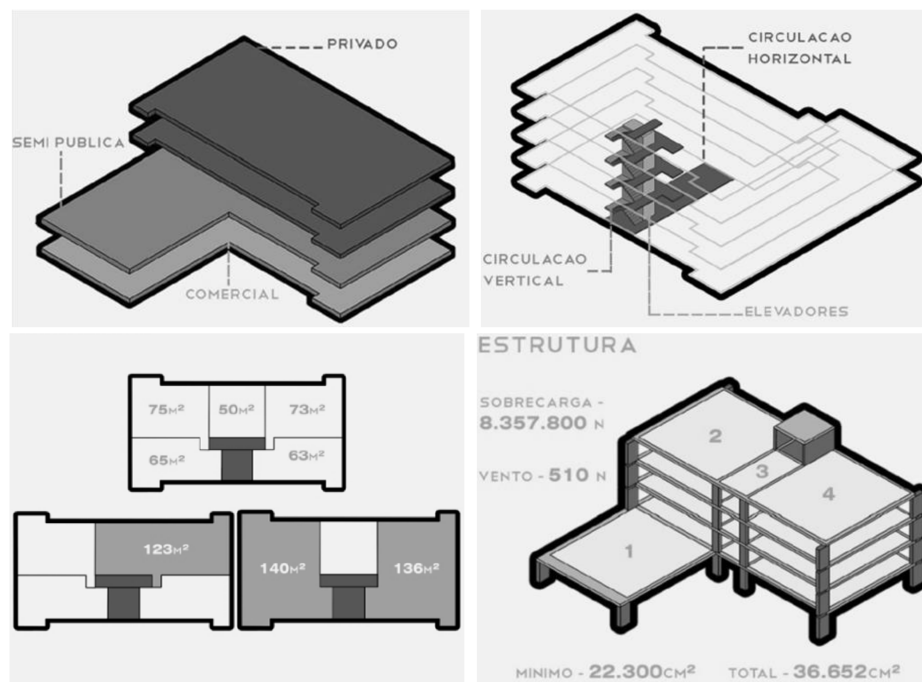


FIGURA 56 – Projeto A: Exemplo de proposta tipológica¹⁶¹
 Fonte: arquivo pessoal da autora

Na proposta em que o projeto foi orientado para o material, a aluna propôs que a articulação do espaço estivesse integrada às características resistentes do sistema estrutural proposto. A proposição desenvolvimento do sistema estrutural se baseou em uma combinação da especificação do sistema em madeira laminada CLT (*Cross Laminated Timber*) com o sistema GLULAM (*Glued Laminated Timber*). A resistência dos materiais especificados restringiu os vãos de projeto, tendo esse parâmetro material servido como principal conformador para a síntese arquitetônica. A aluna propôs que as áreas molhadas (banheiro, cozinha e área de serviço) fossem acopladas ao sistema externamente, pela fachada, de tal maneira que esta flexibilizasse a apropriação do espaço. Esses módulos foram considerados na análise de tensões como cargas laterais, consideração que fez com que a espessura das lajes fosse maior do que a expectativa de pré-dimensionamento inicial, tendo, além disso, restringido a quantidade de aberturas para iluminação e ventilação na fachada (FIG. 57).

¹⁶¹ Projeto A, elaborado por Bernardo Gonçalves Pinheiro.

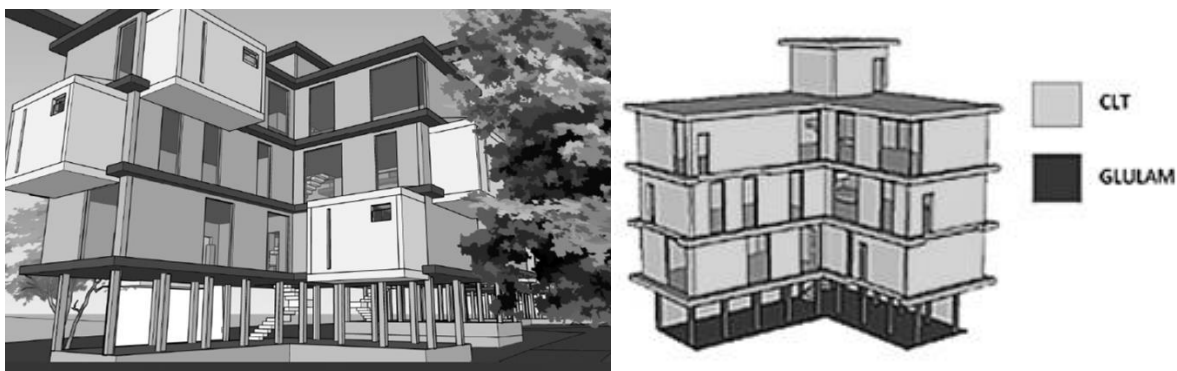


FIGURA 57 – Projeto B: proposta de projeto orientado para o material¹⁶²

Fonte: arquivo pessoal da autora

Na terceira proposta, houve um engajamento dos alunos na proposição da abordagem topológica para a aplicação do conceito de *Open Building*, tendo o procedimento de análise de tensões suscitado uma reflexão sobre as possibilidades de concepção estrutural para além da grelha. O projeto representado na FIG. 58 mostra o desenvolvimento de uma estrutura do tipo *Diagrid*,¹⁶³ em que foi definida uma estrutura principal em que as cargas eram direcionadas para a fachada, sendo responsável pela maior parte da resistência do edifício. Para direcionamento das cargas e sustentação das lajes, foram propostas vigas, cuja distribuição não seguia o padrão perpendicular, uma vez que se apoiavam nos nós do *Diagrid*. De acordo com a análise de tensões, a estrutura proposta na fachada não contemplava a área mínima de material estrutural, devendo ou ser aumentada a espessura dos perfis metálicos tubulares, ou haver a distribuição de pilares internos, funcionando como uma estrutura auxiliar. A primeira possibilidade não atendia os critérios técnicos, uma vez que não haveria no contexto local

¹⁶² Projeto B, elaborado por Maria Isabel Tamião Santana.

¹⁶³ O *Diagrid*, assim como no sistema de treliça, é uma estrutura metálica formando pela interconexão de vigas diagonais, formando elementos triangulares ou quadrangulares, possibilitando grandes vãos no interior da estrutura. A distribuição de cargas é feita da seguinte maneira: as cargas verticais e horizontais são distribuídas ao longo das diagonais, sem interrupções, e, para resistir à flambagem, barras horizontais ancoram os triângulos de maneira a evitar o colapso estrutural. O ângulo de inclinação das barras deve ser sempre inferior a 45° na direção predominante do carregamento, o que aumenta a rigidez e a resistência aos momentos fletores, sendo muito mais eficientes do que uma malha ortogonal. Como o *Diagrid* trabalha através de malhas, ele possibilita uma maior variedade de formas devido às inúmeras possibilidades de configurações, podendo ser usados tanto para torres como para estruturas de formas livres em coberturas. Sua malha não necessita ser regular, o ângulo e a escala de distribuição das barras podem variar de acordo com a solicitação da estrutura (MOUSSAVI, 2009).

a possibilidade de aquisição de perfis maiores, e nem a critérios estéticos, em que perfis mais robustos tirariam a percepção de permeabilidade visual pretendida, tendo sido, dessa forma, projetada a segunda opção.

A proposta buscava concentrar a estrutura na fachada de tal maneira que a ocupação do espaço propiciasse a livre apropriação pelos usuários, inclusive sem haver a preocupação com a unidade estética da fachada, uma vez que essa já é conformada pela própria estética gerada pelo *Diagrid*. Além disso, a abertura total da fachada possibilita uma máxima entrada de luz natural e ventilação. A intenção da proposta de ocupação é dar uma liberdade de apropriação, que de acordo com o aluno, deveria se assemelhar a uma condição de “vila vertical”. Essa desconstrução do padrão de ocupação tradicional também se reproduziu na proposta de circulação, em que a escada não ficou restrita a uma caixa, mas, pelo contrário, sua distribuição irregular propiciava uma dinâmica para o movimento dos usuários. Dessa forma, a concepção estrutural serviu como um parâmetro para a orientação da articulação do espaço e para a unidade estética do edifício, propiciando uma permeabilidade para a articulação entre a edificação e a cidade. O aluno considerou esse processo “revelador”, uma vez que, segundo ele, não reproduziu uma concepção hegemônica da abordagem estrutural.

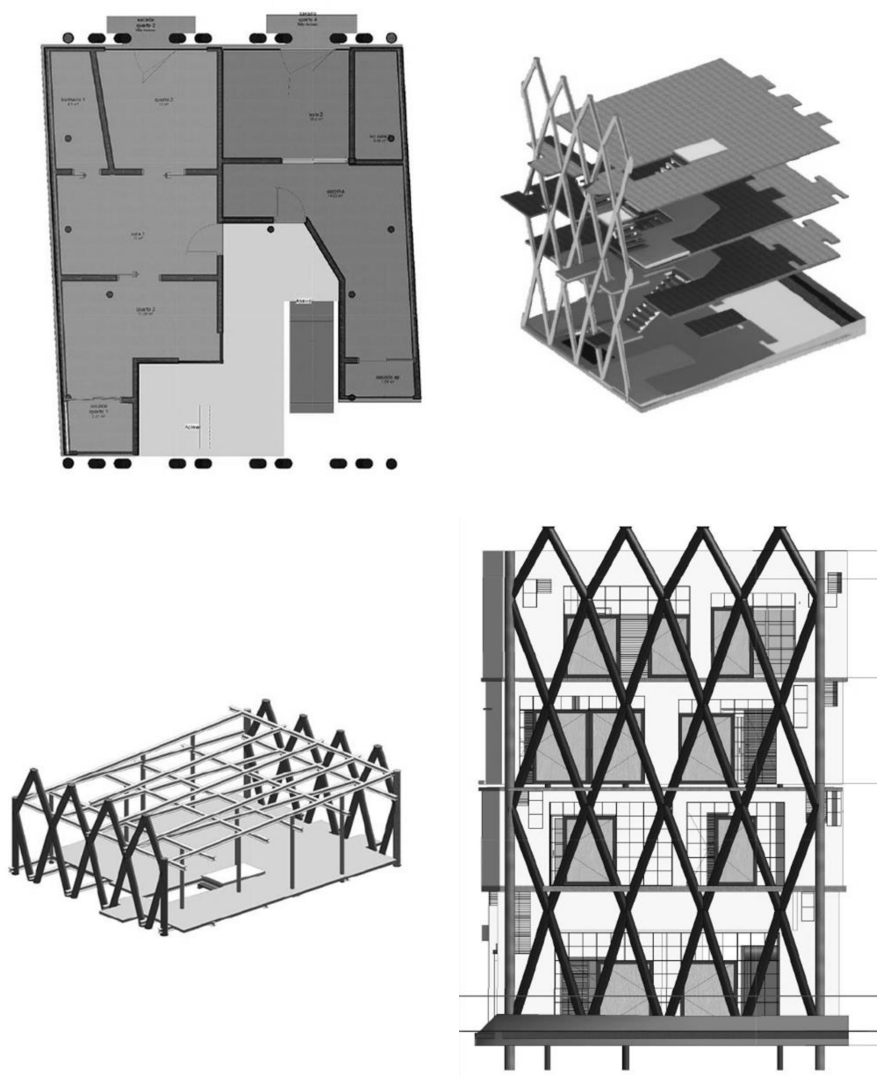


FIGURA 58 - Projeto C: proposta
Fonte: arquivo pessoal da autora

REFLEXÃO-NA-AÇÃO:

Objetivos

Os alunos desenvolveram propostas em que o conceito de *Open Building* foi explorado, porém, o procedimento de *form-finding* estrutural realizado não suscitou na maioria deles o raciocínio topológico pretendido, tendo a maioria, desenvolvido uma abordagem de pré-dimensionamento estrutural no formato de estruturas em grelha conforme raciocínio tipológico.

Processo

O processo foi articulado pelos conceitos de *Open Building*, *form-*

finding e análise de tensões. Houve engajamento no desenvolvimento da articulação do espaço utilizando esses conceitos e na realização do pré-dimensionamento estrutural pelo procedimento apresentado. Os alunos utilizaram ferramenta paramétrica para a modelagem do volume e posterior análise de tensões, porém, uma vez obtido o resultado da análise, o processo de projeção prosseguia em *softwares* CAD, já que não havia nenhum estímulo para o desenvolvimento de processo circular e recursivo para a síntese arquitetônica. No entanto, nos questionários aplicados ao final da disciplina (APÊNDICE I), os alunos demonstraram interesse em se aprofundarem mais na abordagem do processo paramétrico e nas possibilidades oferecidas para além da representação.

Linguagem

A conversa *homem-máquina* no procedimento apresentado se consistiu em um procedimento fechado, não tendo suscitado na maioria dos alunos um engajamento para a aprendizagem de conceitos estruturais, e nem demandado a inclusão do engenheiro de estruturas no processo para o desenvolvimento de relações de cooperação.

Meios

O processo de *form-finding* estrutural foi percebido pela maioria dos alunos como um procedimento simplificado de cálculo de seção transversal para o pré-dimensionamento de estrutura reticular. Nesse modelo de conversação *homem-máquina*, o que se observou é que os alunos que já possuíam conhecimentos avançados de projetos e de estruturas conseguiram se engajar no modelo de conversação pretendido, tendo suscitado uma reflexão sobre a inclusão dos materiais e construtivos para a síntese arquitetônica, utilizando a transação do *software* para aplicação no processo de projeto. O que se percebeu é que a simplificação da linguagem utilizada e sua falta de abertura para o acréscimo de informações não permitiu o engajamento para a recursividade e não propiciou o engajamento com outras conversas, sendo somente uma ferramenta eficiente para que os

alunos explorassem a materialidade do objeto. No entanto, a abordagem para hibridização em que o processo foi conduzido pelos aspectos arquitetônicos se mostrou eficiente para que as considerações dos parâmetros estivessem direcionadas para o contexto e a articulação do espaço.

3.2.4 EXPERIMENTO 4: Oficina Estruturas de Formas Ativas

CONHECER-NA-AÇÃO:

<i>Contexto</i>	Oficina realizada na ocasião da XXII Semana de Arquitetura da PUC Minas, ocorrida no 2º semestre de 2018. A oficina foi conduzida por dois professores de projeto e teve a participação de um engenheiro de estruturas na etapa de construção na escala 1:1. Foram contabilizados aproximadamente 30 alunos participantes.
<i>Linguagem</i>	Conversa <i>homem-máquina-homem</i> utilizando método experimental (prototipagem manual auxiliada por fabricação digital) e método computacional (<i>form-finding</i> por meio do <i>software</i> paramétrico <i>Grasshopper</i> e do <i>plug-in Kangaroo</i>).
<i>Acordo</i>	Construção de protótipo na escala 1:1 de estrutura de forma ativa durante a Semana de Arquitetura para gerar espaço de sombra e convivência para os alunos. Para tanto, os alunos deveriam compreender os princípios conformadores desse tipo de estrutura, absorvendo na teoria e na prática os conceitos relacionados, e, adquirindo habilidades de realizar processo de <i>form-finding</i> por meio do <i>software</i> paramétrico <i>Grasshopper</i> e do plugin <i>Kangaroo</i> ¹⁶⁴ , compreendendo as relações entre forma e força tanto por meio de simulação computacional, quanto pela prática material de construção.
<i>Engajamento</i>	A oficina foi dividida em quatro momentos, sendo o primeiro uma aula expositiva para apresentação dos conceitos de <i>form-finding</i> ; o segundo, a confecção de protótipo manual para familiarização com a prática; o terceiro, a realização de aulas práticas para aprendizagem do <i>software</i> ; e, o quarto, a construção do protótipo na escala 1:1.

¹⁶⁴ O *Kangaroo* é um *plugin* para o *Grasshopper* que simula o processo de *form-finding* de estruturas funiculares.

Ação e (Trans)ação A oficina iniciou-se com aula expositiva para apresentação dos princípios da estrutura funicular¹⁶⁵ e para compreensão do processo de adaptar a forma da estrutura para ser funicular à condição de carga, também chamado de procedimento de *form-finding*. Foi apresentado o processo histórico do uso de procedimentos de *form-finding* de estruturas funiculares para aplicação na arquitetura, tendo os primeiros antecedentes nas obras da Arquitetura Gótica que exploraram este princípio para construir formas complexas trabalhando somente à compressão, passando por Antoni Gaudí, Heinz Isler e Frei Otto no século XX, até culminar na transposição do conceito para os métodos computacionais (APÊNDICE J).

Após abordagem teórica, foi realizada aula prática para montagem de protótipo para teste do procedimento. Nessa aula, foi mostrado o vídeo do experimento análogo realizado pelo grupo *Block*¹⁶⁶ da ETH de Zürich. Nesse experimento, o carregamento que conformou a estrutura funicular foi o empuxo dos balões presos aos nós da malha. Dessa forma, foram fornecidos aos alunos materiais para a montagem do protótipo de teste, que consistiu em palitos de madeira com 40 cm de comprimento, balões a gás e peças de madeira para a realização das conexões, produzidas por meio de fabricação digital.

Os participantes receberam as instruções relativas à montagem do protótipo e se dividiram em 3 equipes, em que cada uma realizou um tipo de teste de malha. Uma equipe testou uma malha quadrangular; a outra, uma malha hexagonal, e a terceira, uma malha triangular, tendo

¹⁶⁵ Estrutura Funicular é uma estrutura que pode atingir o estado de equilíbrio adotando um mecanismo para encontrar a geometria correspondente às cargas aplicadas. O processo de adaptar a forma da estrutura para ser funicular à condição de carga é chamado de *form finding*.

¹⁶⁶ O *Block Research Group* (BRG) do Instituto de Tecnologia em Arquitetura da ETH Zurich, é liderado pelo professor Philippe Block e por Tom Van Mele. A pesquisa do grupo concentra-se na análise gráfica e métodos experimentais de projeto e construção por meios digitais, cujo objetivo principal é compreender as reais demandas de problemas complexos de projeto estrutural, desenvolvendo algoritmos e ferramentas acessíveis e eficientes para informar a síntese projetual.

sido também realizado teste dos tipos de conexão. A malha triangular não se conformou como uma estrutura funicular, mas conseguiu se efetivar como uma forma tridimensional, embora muitos nós não tenham se levantado (FIG. 59, à esquerda). O grupo que decidiu explorar o padrão hexagonal não obteve nenhum resultado significativo na transposição da forma bidimensional para a forma tridimensional (FIG. 59, ao centro). No entanto, a malha que melhor se conformou foi a malha quadrangular (FIG. 59, à direita), que a princípio foi vista pelos outros participantes como uma formação pouco criativa. Esse processo de percepção da relação entre o padrão da malha e a sua conformação tridimensional fez com que os alunos compreendessem de maneira prática que a complexidade geométrica no padrão da malha não se transferiu para a formação de uma estrutura eficiente.



FIGURA 59 - Teste das malhas triangular (à esquerda), hexagonal (ao centro) e quadrangular (à direita)
Fonte: arquivo pessoal da autora

Após a experiência de sensibilização por meio da prática, a oficina foi desenvolvida por 4 (quatro) semanas no laboratório de informática para que os alunos aprendessem a realizar a simulação do processo de *form-finding* por meio de modelagem paramétrica utilizando os *softwares Grasshopper* e *Kangaroo* (FIG. 60). Essas aulas ocorreram anteriormente à Semana de Arquitetura, tendo sido proposto aos alunos, após a aprendizagem do *software*, que fosse desenvolvido

projeto para a construção em escala 1:1, considerando a restrição do material, do tempo de montagem e das ações às quais a estrutura estaria submetida, devendo ser considerados principalmente os efeitos da dilatação térmica e do vento.



FIGURA 60 - Simulação no *Kangaroo*
Fonte: arquivo pessoal da autora

As simulações de *form finding* realizadas no programa *Kangaroo* exigem que sejam dados para informações de *input*, a geometria bidimensional, a força aplicada, os pontos de apoio e a elasticidade do material. Essas informações possibilitam que o algoritmo do *software* “encontre” a forma, simulando o comportamento físico de uma estrutura funicular, uma vez que a força da gravidade também consiste em um elemento presente na simulação. Para a informação desses *inputs* conformadores, os alunos foram informados das restrições materiais a serem consideradas para o projeto. Estas restrições estavam relacionadas às características dos materiais (barras que seriam utilizadas, possibilidades de conexões, balões disponíveis no mercado), e, também, às condições de trabalho (local de construção disponível, quantidade de alunos envolvidos, ferramentas disponíveis e prazo de execução). O cálculo da força a ser aplicada em cada nó deveria estar relacionada ao empuxo dos balões, e conseqüentemente às suas características (diâmetro, material e resistência). Estabeleceu-se, por

uma questão de logística e segurança, que haveria disponibilidade de apenas 10m³ de gás hélio, o que se constituiu como um parâmetro orientador da estrutura a ser construída.

Como orientação de projeto foi estabelecida que devesse ser gerado o maior vão possível a partir da quantidade de material disponível, tendo como objetivo a conformação de um espaço temporário de sombra para os participantes da Semana de Arquitetura. Para que os alunos pudessem desenvolver o projeto e realizar o cálculo das quantidades de balões necessárias para a construção, e para esta se conformar como um espaço de uso foi dado o seguinte exemplo de projeto (FIG. 61):

EXEMPLO

1. **Tamanho da malha:** 400x400cm

2. **Pontos de âncora:**

1 (x=0, y=80) 2 (x=80, y=400);
3 (x=360, y=40) 4 (x=400, y=320)

3. **Diâmetro e quantidade de balões:**

Balão de Ø64cm

Volume balão = $\frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3} \times \pi \times 32^3$
= 137.188,69 cm³ = 0,137 m³

Densidade = 0,1785 kg/m³

Empuxo = 0,137m³ x 0,1785 kg/m³ x 10 m/s²

= 0,24N = 24 gramas

24g > 10,92g = 1 balão por nó

Quantidade de balões=117

Volume total de gás =

0,137m³ x 117balões = 16,02m³

4. **Quantidade de palitos:** 100

5. **Quantidade de conexões:** 121

6. **Deformação máxima**

(tamanho mínimo da conexão): 0,007cm

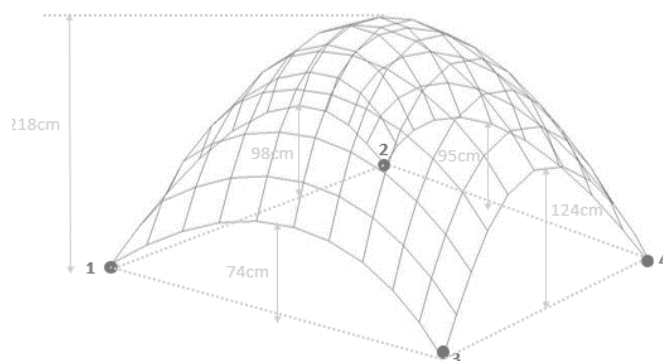
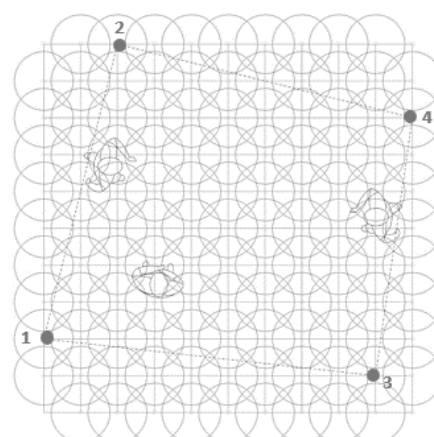


FIGURA 61 - Exemplo de projeto de *form-finding*

Fonte: elaboração da autora

Após realizarem exercício para a compreensão do processo, os alunos conjuntamente optaram por desenvolver projeto para a construção a partir da combinação de três malhas de 3,20 m x 3, 20 m, com três balões de Ø9" em cada nó, para o que, de acordo com os cálculos realizados, a quantidade de 10 m³ de gás hélio seria suficiente para o empuxo das malhas (FIG. 62).

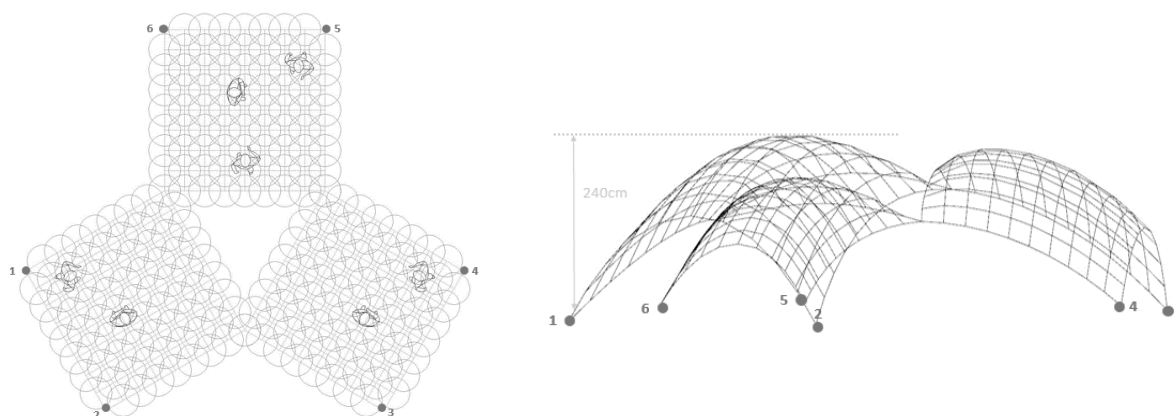


FIGURA 62 - Projeto final
Fonte: elaboração da autora

Na ocasião da Semana de Arquitetura, logo antes da construção do protótipo, foi convidado engenheiro de estruturas¹⁶⁷ pesquisador integrante do grupo *Block* da ETH de Zürich, para realização de palestra e participação na montagem da estrutura em escala 1:1. A palestra abordou a aplicação de ferramentas computacionais avançadas que permitem a interface entre arquitetura e engenharia na concepção de projetos. Foram abordados na palestra temas como a criação de estruturas de formas ativas por meio de modelos paramétricos, em que a exploração de estruturas criativas e inovadoras só é possível por meio do trabalho cooperativo entre arquitetos e engenheiros. O engenheiro mostrou trabalhos realizados no grupo *Block Research Group* da ETH de

¹⁶⁷Participação do engenheiro de estruturas Ricardo Avelino. A formação do engenheiro civil foi em parte realizada na Poli USP e, em parte na *École des Ponts et Chaussées* onde fez parte do grupo de pesquisa *ThinkShell*. Posteriormente trabalhou como engenheiro de estruturas no escritório SOM em São Francisco, EUA, realizou mestrado na ETH Zurich no grupo *Block Research Group* e atualmente está desenvolvendo pesquisa de doutorado na mesma instituição na área de otimização de estruturas.

Zürich, em que existe um resgate histórico da relação forma e resistência, cujo enfoque se situa principalmente nas soluções de eficiência material apresentadas na arquitetura do período gótico. A palestra foi finalizada com uma reflexão sobre a relação entre engenheiros e arquitetos, e sobre como as ferramentas digitais têm possibilitado uma revisão dessas relações e diluído as fronteiras disciplinares. O engenheiro também mencionou a importância de que os estudos de otimização com forma e resistência por meio de ferramentas digitais sejam não somente utilizados para a produção de formas estruturais visualmente expressivas, mas sejam estendidos ao benefício que estes processos poderiam suscitar no atendimento às comunidades carentes, tendo em vista a escassez de recursos materiais.

A construção da estrutura funicular foi programada para ocorrer em dois dias. No primeiro dia, os participantes foram instruídos a confeccionarem a malha e suas conexões. Os participantes se dividiram em 3 equipes, para a confecção de 3 malhas. Todo o material ficou preparado para a montagem no dia seguinte. No segundo dia, os participantes iniciaram o trabalho fazendo a demarcação das estacas no terreno para delimitar o espaço que a malha iria ocupar. Foram montadas 3 malhas de 7 x 7 palitos, e os balões começaram a ser enchidos. Decidiu-se, como forma de otimizar o trabalho, utilizar 2 balões de 9" em cada nó (FIG. 63), contrariando o que havia sido calculado e simulado no *Kangaroo*. Um fator importante, que foi desconsiderado para a construção, foi admitir a impossibilidade de controlar a quantidade de gás em cada balão, não sendo possível obter precisão neste processo, estando uns maiores e outros menores, ou seja, o que gerava uma variação da carga aplicada por nó.



FIGURA 63 - Malha com 2 balões em cada nó
Fonte: elaboração da autora

As distorções do cálculo e a redução da quantidade de balões fizeram com que a malha permanecesse no chão. Apenas alguns nós se levantaram, nós estes que tinham balões com maior quantidade de gás hélio, ou seja, onde o empuxo era maior. Devido ao clima quente, muitos balões já estavam estourando, o que exigiu dos participantes uma tomada de decisão rápida para simular o efeito desejado. Ficou decidido que iriam concentrar em apenas uma malha uma quantidade de 6 balões por nó. Ao colocar carga de 4 balões por nó, a malha sofreu o empuxo desejado e se conformou como uma estrutura funicular. Assim, o resultado do protótipo confirmou os problemas e os acertos dos cálculos e da simulação computacional realizada, servindo como uma analogia dos processos realizados na prática profissional e das interferências que podem ocorrer entre a proposta arquitetônica, o cálculo estrutural e a construção da forma final (FIG. 64).



FIGURA 64 - Protótipo 1:1 finalizado

Fonte: elaboração da autora

REFLEXÃO-NA-AÇÃO:

- Objetivos* A construção do protótipo na escala 1:1 se realizou tendo como referência processo de *form-finding* computacional. No entanto, a escala da espacialidade desejada e o uso pretendido não se concretizaram devido às restrições de materiais, as dificuldades construtivas e os efeitos ambientais (dilatação térmica e carga de vento), que não foram considerados na simulação.
- Processo* Em questionários respondidos ao final da etapa de projeto da oficina (APÊNDICE K), a maioria dos alunos relatou dificuldades com a compreensão dos conceitos e da modelagem paramétrica. No entanto, a maioria respondeu que utilizaria os conceitos e os *softwares* apresentados em outros projetos, e que gostariam de ter a oportunidade de se aprofundarem nos estudos, principalmente para a projeção de coberturas, tendo alguns se referido às possibilidades de otimização do peso e outros às possibilidades estéticas proporcionadas para a produção de formas orgânicas.
- Linguagem* O uso da linguagem *homem-máquina-homem* ocorreu neste processo de forma fragmentada, estando a participação do engenheiro de estruturas desconectada da simulação no *software*. A desfragmentação do processo poderia potencialmente ter evitado os problemas na construção. A relação de cooperação com o engenheiro ocorreu durante a construção, tendo auxiliado na orientação dos alunos para uma mudança de estratégia que propiciasse a viabilidade de conformação da estrutura, mesmo que essa não representasse a espacialidade desejada.
- Meios* A realização da oficina e a inclusão da construção no processo suscitaram uma reflexão sobre os limites da prática de simulação computacional e em como a construção e suas condicionantes podem

estimular um treinamento para uma prática dialética. O processo de construção do protótipo para a compreensão dos conceitos trabalhados anteriormente à prática computacional foi importante para que houvesse uma sensibilização dos alunos com relação à correspondência do processo físico com as simulações realizadas no *software*. O processo reverso, em que a forma foi simulada e posteriormente construída, levou a novas reflexões, propiciando um processo circular e recursivo contínuo entre *performance* material e construção, estimulando dessa forma o desenvolvimento nos alunos de um raciocínio projetual tectônico.

3.5.5 EXPERIMENTO 5: Projeto em Estruturas Metálicas e de Madeira

CONHECER-NA-AÇÃO:

Contexto Experimento realizado no 2º semestre de 2018 em disciplina regular do currículo do curso de Arquitetura e Urbanismo noturno da PUC Minas, ofertada para alunos do 6º semestre, conduzida pela autora desta tese, tendo tido a participação de 13 (treze) alunos matriculados.

Linguagem Método experimental (prototipagem manual e por fabricação digital).

Acordo Aprendizagem de sistemas estruturais em aço e em madeira com enfoque para a tecnologia e resistência dos materiais, elementos e produtos de construção, tecnologia construtiva e funcionamento estrutural por meio de exercícios projetuais, com ênfase na concepção e pré-dimensionamento estrutural.

Engajamento Como proposta de método de trabalho (APÊNDICE L), a disciplina se dividiu em dois módulos, sendo o primeiro com enfoque nas estruturas metálicas, e o segundo, com enfoque nas estruturas de madeira. Em ambos os módulos, foram trabalhados aspectos teóricos por meio de aulas expositivas e seminários, e aspectos práticos com o desenvolvimento de protótipos manuais e com a utilização de máquinas de fabricação digital.

As aulas expositivas abordaram qualitativamente as características dos materiais assim como os sistemas estruturais e construtivos, tendo como ênfase capacitar os alunos a elegerem adequadamente um sistema estrutural metálico ou de madeira. Os seminários consistiram em pesquisar soluções estruturais e construtivas desenvolvidas para obras conhecidas com o uso de estruturas metálicas¹⁶⁸ e estruturas de

¹⁶⁸ Sugeriu-se que fossem pesquisadas as obras City Hall (Londres), Tower Hearst (Nova York), Tower Swiss Re

madeira,¹⁶⁹ definidas para cada grupo por meio de sorteio.

A confecção dos protótipos visou a desenvolver uma abordagem prática com o objetivo de sensibilizar os alunos para o desenvolvimento de uma capacidade imaginativa com relação ao comportamento estrutural. O primeiro exercício de prototipagem consistiu em desenvolver modelo paramétrico no *Grasshopper* a partir das referências tipológicas apresentadas no livro *The Function of Form* (MOUSSAVI, 2009). O objetivo era propiciar aos alunos a compreensão do comportamento estrutural de tipologias estruturais contemporâneas, similares às estruturas estudadas no seminário.

A proposta para a construção do segundo protótipo foi a construção de um banco em madeira baseado no conceito de *tensegrity*. Os alunos poderiam utilizar elementos de barra ou placa de madeira, podendo ser utilizadas cordas auxiliares, de tal maneira que fosse evitado o momento fletor, estando esse submetido somente às forças de tração e compressão. O objetivo da construção do banco foi propiciar a construção de um protótipo submetido à carga (no caso, ao peso dos elementos do grupo, que deveriam se sentar sem que a estrutura perdesse sua estabilidade), e não somente se constituir como um modelo de representação. Após a construção e o teste, foi realizada com a turma uma reflexão sobre o comportamento dos protótipos, na tentativa de compreender por meio dos deslocamentos apresentados, o fluxo de forças percebido na estrutura.

E, por fim, por orientação da abordagem pedagógica do curso, que visava à integração entre as disciplinas, foi proposto que os alunos

(Londres), Marseille-vieux-port (Marseille) de Norman Foster; BMW Welt (Munique), Musée des Confluences (Lyon) e Busan Cinema Center (Coreia do Sul), do escritório Coop Himmelblau.

¹⁶⁹ Sugeriu-se que fossem pesquisadas as obras Maggie's Center (Manchester), Crossrail Station at Canary Wharf (Chicago), Kulm Eispavilion (Suíça), de Norman Foster; Center Pompidou-Metz (França) e Tamedia Office Building (Suíça), de Shigeru Ban; Sumika Pavilion (Tóquio) de Toyo Ito; Yushara Wooden Bridge Museum (Japão), de Kengo Kuma.

aplicassem os conceitos apreendidos por meio da concepção e o pré-dimensionamento em estruturas metálicas ou de madeira no projeto que estariam desenvolvendo concomitantemente em outra disciplina de projeto em curso no semestre.

Ação e (Trans)ação Após as aulas expositivas realizadas na primeira etapa da disciplina, com enfoque para as propriedades técnicas e construtivas das estruturas metálicas, os alunos apresentaram no seminário as obras contemporâneas sorteadas para cada grupo, em que houve uma tentativa de compreender a relação entre forma, força e resistência. Esse exercício de análise de obras de arquitetura contemporânea, em que a complexidade estrutural não pode ser representada por ferramentas computacionais do tipo CAD, serviu como estímulo para a introdução à modelagem paramétrica, propiciando aos alunos a compreensão dos métodos utilizados para a projeção das formas estruturais analisadas. Dessa maneira, os alunos foram introduzidos à modelagem paramétrica no *Grasshopper*, visando à compreensão prática dos processos de projeto utilizados nas obras sugeridas. Embora tenha havido grande entusiasmo inicial, na segunda aula prática do *software*, muitos se sentiram desmotivados a continuarem a modelagem, alegando dificuldades enfrentadas para o desenvolvimento dos algoritmos. Alguns decidiram realizar no *AutoCad* ou no *SketchUp* o modelo para a produção dos protótipos. Apenas os alunos que estavam modelando coberturas em formas livres é que insistiram na modelagem paramétrica pela dificuldade de executá-la em outros *softwares*.

Três grupos se engajaram no desenvolvimento de estruturas do tipo *Diagrid* para formas ortogonais. O primeiro grupo (FIG. 65, à esquerda) procurou reproduzir a estrutura do edifício Tower Hearst projetado por Norman Foster, já que haviam estudado essa estrutura para o seminário e apresentavam familiaridade com as estratégias de projeto e construção. Na construção do protótipo, o grupo reproduziu estratégia

semelhante à utilizada pela construção do edifício utilizado como referência, tendo posicionado as lajes nos nós dos cantos do edifício de tal maneira que essas servissem de prumo para a confecção do protótipo e assim aumentassem sua resistência, mantendo a estabilidade. O segundo grupo (FIG. 65, ao centro) trabalhou o conceito de otimização estrutural, concentrando mais barras na base e tendo menos material no topo. O grupo também utilizou a estratégia de simular elementos de lajes para auxiliar na construção e estabilidade do protótipo. O terceiro grupo (FIG. 65, à direita) não utilizou esta estratégia, tendo posicionado os palitos uns sobre os outros. O resultado do protótipo não foi o esperado pelo grupo, tendo ficado esteticamente grosseiro e estruturalmente instável.

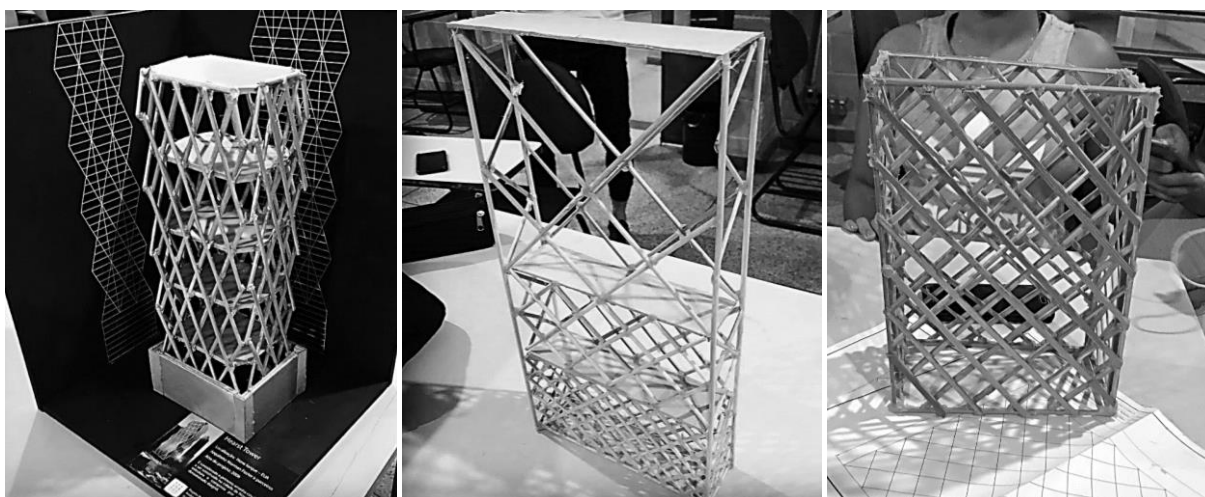


FIGURA 65 - Protótipos A¹⁷⁰, B¹⁷¹ e C¹⁷², respectivamente
Fonte: arquivo pessoal da autora

Outros dois grupos desenvolveram estruturas verticais para formas cônicas. O primeiro (FIG. 66, à esquerda) confeccionou moldes de isopor para servir de prumo para a modelagem da estrutura e para garantir o alinhamento dos nós. O segundo grupo (FIG. 66, à direita) procurou reproduzir a forma estrutural do projeto Tower Swiss Re de Norman Foster, que também havia sido apresentado pelo grupo no

¹⁷⁰ Protótipo elaborado por Andréia Barbosa Gomes e Victor Hugo Nascimento Lima.

¹⁷¹ Protótipo elaborado por André José Borges de Aguiar e Vinícius Henrique Jesus Pereira.

¹⁷² Protótipo elaborado por Izabelle Cristal Egídio e Lucas Sander de Pinho.

seminário. No entanto, o grupo não desenvolveu estratégias para a confecção do protótipo, tendo utilizado um material altamente flexível que não conferia a rigidez requerida para a estrutura.

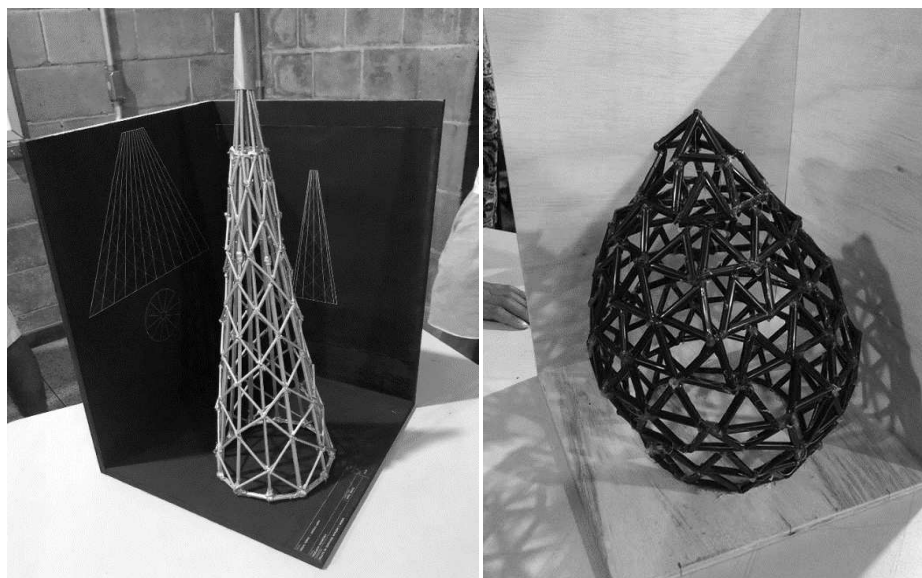


FIGURA 66 - Protótipos D¹⁷³ e E¹⁷⁴, respectivamente
Fonte: arquivo pessoal da autora

Um único grupo se propôs a desenvolver uma cobertura de forma livre, que só pôde ser representada por meio do uso do *Grasshopper*. Houve um engajamento na concepção da estrutura e na compreensão de possíveis estratégias construtivas. Num primeiro momento, o grupo tentou realizar a construção com o uso de palitos de madeira, mas consideraram que este material dificultava a conformação do protótipo. Devido à complexidade da forma, o grupo optou por utilizar canudos plásticos, uma vez que a flexibilidade do material poderia auxiliar na reprodução da forma projetada. No entanto, o grupo não conseguiu reproduzir a forma tal qual o projeto, não tendo obtido as mesmas curvaturas originalmente propostas, que eram bem mais suaves do que as confeccionadas no protótipo (FIG. 67).

¹⁷³ Protótipo elaborado por Adolfo Ferraz Fernandes e Matheus Felipe Oliveira Marra.

¹⁷⁴ Protótipo elaborado por Ana Cecília Martins Gonçalves e Pedro Araújo Gonçalves de Faria.

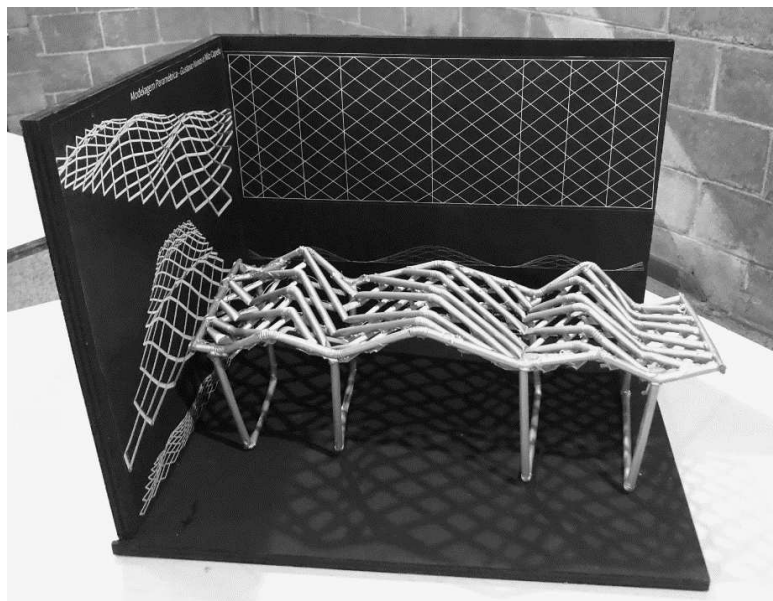


FIGURA 67 - Protótipo F¹⁷⁵ de cobertura em forma livre
Fonte: arquivo pessoal da autora

Ao reproduzirem os modelos fisicamente, os alunos perceberam algumas dificuldades construtivas, tendo alguns grupos se frustrado com o resultado obtido, em que a construção não se efetivou de acordo com a obra projetada. Sendo assim, os alunos perceberam a complexidade da construção das formas projetadas, uma vez que os erros na escolha do material e nas estratégias de montagem não levavam a uma reprodução fiel do projeto. Em uma conversa ao final do exercício, a turma pôde perceber que alguns protótipos funcionavam melhor que os outros devido à menor complexidade da geometria adotada ou pelo cuidado do grupo em desenvolver estratégias de montagem. O exercício serviu como uma boa analogia entre os problemas que ocorrem entre o projeto e a construção.

O módulo dedicado às estruturas de madeira, assim como o módulo anterior, iniciou-se com aulas expositivas para uma abordagem qualitativa do material, seguido pelo seminário em que os alunos analisaram obras contemporâneas em madeira, de tal maneira que deveria ser percebida a relação entre as características do material com

¹⁷⁵ Protótipo elaborado por Gustavo Nunes Lara e Nilo Fernando Capelo Júnior.

a forma e com sua resistência. Para a aplicação prática dos conceitos estudados, os alunos foram orientados a fazer um protótipo de banco utilizando os princípios do *tensegrity*, ou seja, sendo solicitados essencialmente a esforços de tração e compressão, utilizando como materiais compensado de madeira e cordas, devendo ser realizado um teste de força e resistência dos bancos utilizando o peso do corpo (FIG. 68). Foi dada a opção de se utilizar o laboratório de fabricação digital e todos os alunos se engajaram em produzir os protótipos utilizando a máquina de corte a *laser*.



FIGURA 68 - Teste de força e resistência dos protótipos
Fonte: arquivo pessoal da autora

Os grupos que desenvolveram protótipos de bancos adotaram a mesma estratégia para propiciar a resistência da forma, tendo tido apenas variações de geometria. Todos conceberam estruturas de encaixe utilizando uma peça para o assento e duas peças cruzadas para os pés, tendo maior concentração de material próximo ao assento, de tal maneira a garantir a resistência do banco. A variação dos protótipos deste tipo se deu somente pelas inclinações estéticas de cada grupo, tendo o primeiro adotado uma geometria de linhas retas, o segundo, formas mais arredondadas, e o terceiro, explorado recortes e formas

curvas de maneira ornamental (FIG. 69).



FIGURA 69 - Protótipos de bancos A¹⁷⁶, B¹⁷⁷ e C¹⁷⁸, respectivamente
Fonte: arquivo pessoal da autora

Os protótipos de cadeiras tiveram duas abordagens diferentes (FIG. 70). O primeiro explorou a combinação da madeira com o uso de cordas, em uma tentativa de reproduzir um projeto que o grupo havia visto na internet. A estrutura ficou estável, mas não resistiu à carga das pessoas assentadas. A segunda estrutura utilizou somente barras de madeira. O grupo adotou uma estratégia em que as barras poderiam ter suas posições alteradas, de tal maneira que, caso no teste da resistência à carga essa não fosse validada, haveria possibilidade de configurá-la até que a estrutura resistisse às forças aplicadas, em um processo circular e recursivo analógico.

¹⁷⁶ Protótipo elaborado por Izabelle Cristal Egídio e Lucas Sander de Pinho.

¹⁷⁷ Protótipo elaborado por André José Borges de Aguiar e Vinícius Henrique Jesus Pereira.

¹⁷⁸ Protótipo elaborado por Andréia Barbosa Gomes e Victor Hugo Nascimento Lima.



FIGURA 70 - Protótipos de cadeiras A¹⁷⁹ e B¹⁸⁰

Fonte: arquivo pessoal da autora

O protótipo do banco deveria resistir à carga dos próprios componentes do grupo. Essa atividade foi realizada como uma forma de fazer uma analogia às solicitações de carga que uma estrutura recebe, buscando suscitar uma reflexão em escala real sobre a relação entre forma e resistência. Após a apresentação e o teste de carga dos protótipos, foi realizada uma roda de conversa para que os alunos pudessem refletir sobre seus erros e acertos com relação à concepção da forma, as forças que a solicitam e sua resistência (geometria, materiais e seções transversais).

Após a confecção dos protótipos e a finalização do módulo de madeira, foi proposto como trabalho final da disciplina a aplicação dos conceitos aprendidos para concepção e pré-dimensionamento do sistema estrutural do projeto que estava sendo desenvolvido na disciplina de projeto em curso naquele semestre. A maioria estava desenvolvendo projeto para a disciplina *Equipamento Metropolitano*, mas muitos afirmaram não ser possível realizar tal pré-dimensionamento devido ao

¹⁷⁹ Protótipo elaborado por Ana Cecília Martins Gonçalves e Pedro Araújo Gonçalves de Faria.

¹⁸⁰ Protótipo elaborado por Gustavo Nunes Lara e Nilo Fernando Capelo Júnior.

descompasso com o grau de desenvolvimento do projeto, estavam ainda em uma etapa muito preliminar. Alguns recorreram a projetos de outros semestres somente para validação da estrutura lançada. Muitos resolveram apenas adaptar o sistema concebido em concreto para aço. A maioria dos alunos não demonstrou interesse em aplicar soluções estruturais vistas nos projetos analisados no seminário e na produção de modelos paramétricos. Apenas 1 (um) aluno se engajou na modelagem paramétrica no *Grasshopper* e propôs uma estrutura no formato *Voronoi*, conforme orientação do professor da disciplina de projeto, que demandou dos alunos uma “ousadia” na plasticidade da forma apresentada (FIG. 71). O aluno também decidiu utilizar novamente o laboratório de fabricação digital para confecção de protótipo, tendo surgido um grande interesse em pesquisar mais profundamente sobre a estabilidade de estruturas do mesmo tipo, tendo inclusive solicitado referências bibliográficas para a continuidade do estudo posteriormente à disciplina.

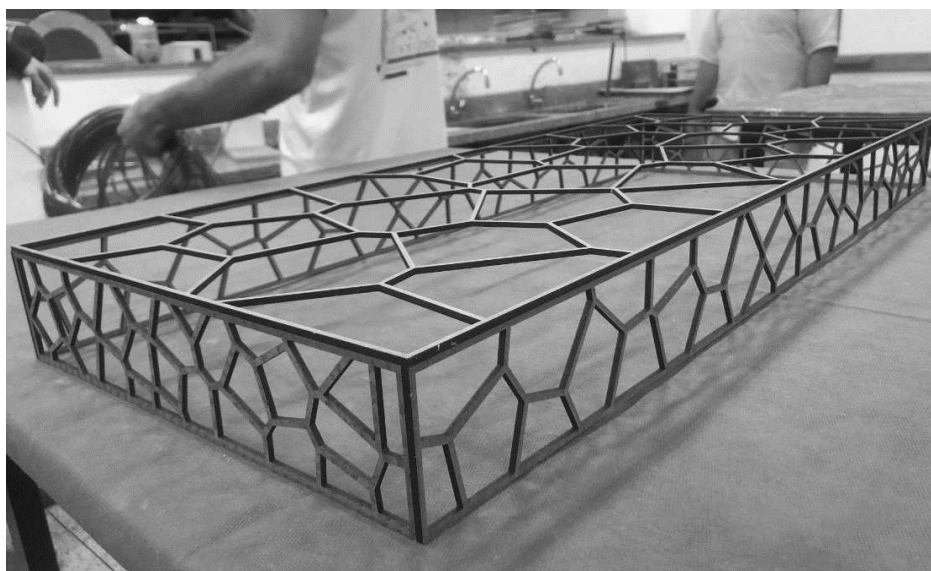


FIGURA 71 - Protótipo de estrutura em padrão *Voronoi*¹⁸¹

Fonte: arquivo pessoal da autora

¹⁸¹Protótipo elaborado por Gustavo Nunes Lara.

*REFLEXÃO-NA-AÇÃO:**Objetivos*

Nesta disciplina, o enfoque do processo de ensino e aprendizagem foi essencialmente qualitativo e experimental, em que se pode perceber que os alunos tiveram grande engajamento para a análise de obras icônicas para apresentação nos seminários e para a reprodução de modelos por meio da confecção de protótipos. No entanto, na atividade final de concepção estrutural e pré-dimensionamento, foi percebida a dificuldade da transferência dos conceitos apreendidos para a prática da projeção arquitetônica. Os alunos atribuíram essa dificuldade a um “cansaço com as demais disciplinas” e à “falta de tempo” para desenvolverem melhor o trabalho.

Processo

Em questionário aplicado ao final da disciplina (APÊNDICE M), ao serem interrogados se consideravam o ensino de estruturas qualitativo suficiente para a aprendizagem de sistemas estruturais, os alunos tiveram respostas divergentes, tendo metade da turma considerado a aprendizagem de linguagem matemática essencial, e, a outra metade, considerado que a abordagem por meio de protótipos havia sido suficiente para a compreensão dos conceitos. Os alunos mencionaram que gostariam de aprofundar nos conceitos de modelagem paramétrica e fabricação digital, aprendendo linguagem matemática por meio das novas tecnologias de projeção.

Linguagem

O uso de métodos experimentais com abordagem qualitativa propiciou uma reflexão sobre o processo de projeção arquitetônica e a sua concretização por meio da construção, sensibilizando os alunos a pensarem sobre as estratégias construtivas ainda na etapa de concepção do projeto. No entanto, a linguagem adotada não propiciou para a maioria dos alunos a transposição dos conceitos apreendidos para a concepção estrutural e o pré-dimensionamento na prática de projeção.

Meios

A reflexão suscitada por meio da construção de protótipos foi considerada interessante para a realização de estudo preliminar na prática de projeção, de tal maneira que essa suscita a inclusão de parâmetros construtivos na síntese projetual, podendo ser realizada em uma etapa anterior à conversa *homem-máquina* (o que foi realizado no experimento 6). A prototipagem também apresentou potencial para desenvolver uma circularidade por meio de um processo de reflexão, confirmando ou refutando hipóteses e estratégias desenvolvidas digitalmente. Dessa forma, constatamos que o método de prototipagem é fundamental quando combinado com outros métodos; no entanto, enquanto única ferramenta de ensino, não possibilita que os alunos desenvolvam flexibilidade cognitiva¹⁸² para a transferência dos conceitos abordados para a síntese projetual.

¹⁸² O conceito de flexibilidade cognitiva refere-se à capacidade que o sujeito tem perante uma situação nova ou problema, reestruturar o conhecimento para resolver a situação. A Teoria da Flexibilidade Cognitiva (SPIRO *et al.*, 1988) aborda a dificuldade em transferir conhecimentos complexos e pouco estruturados para novas situações. Seu objetivo de estudo é compreender como ocorre a aquisição de conhecimentos de nível avançado em domínios complexos e pouco-estruturados, ou seja, onde o indivíduo deve articular os conhecimentos construídos, diante de situações anteriores, para que seja possível, ao se deparar com um problema novo, chegar a uma nova solução. Tradicionalmente no ambiente escolar, conteúdos complexos são dados de maneira bem estruturada, a partir dos quais o professor seleciona o que deve ser passado, e a aplicação só ocorre em exercícios e provas direcionados a se verificar o conteúdo selecionado pelo professor. Este modelo não permite que os estudantes adquiram autonomia para aplicar o conhecimento em outras situações, não havendo qualquer flexibilidade no ensino e no uso do conhecimento. A aprendizagem em domínios complexos e pouco estruturados requer múltiplas representações do conhecimento, ou seja, múltiplas explicações e múltiplas dimensões de análise. A Teoria da Flexibilidade Cognitiva propõe orientações para ensinar em fases avançadas de aprendizagem em domínios pouco estruturados de forma a atingir os objetivos de aprendizagem como o domínio da complexidade e a utilização do conhecimento em situações novas. Tivemos contato com o conceito da flexibilidade cognitiva por meio de oficina ofertada na ocasião dos Percursos Formativos Docentes da UFMG, ofertado para alunos de pós-graduação, realizados no 1º semestre de 2016 (Oficina Teoria da Flexibilidade Cognitiva). Compreendemos que o ensino de estruturas nos cursos de Arquitetura utilizando Método Analítico consiste em uma atitude epistemológica positivista, em que os exemplos são utilizados como ilustrações das teorias e competências, que os sujeitos deverão assim memoriza-los; enquanto deveria ser adotada uma atitude epistemológica construtivista, em que os casos deveriam assumir um papel de representação da complexidade, incerteza e ambiguidade, permitindo por meio de uma prática dialógica, uma análise flexível e reflexiva da situação, desenvolvendo assim flexibilidade cognitiva. Para Ferreira-Alves e Gonçalves (2001), a natureza interativa do computador potencializa a aquisição da flexibilidade cognitiva, em termos pedagógicos, no contexto de uma educação narrativa que, por sua vez, valida a complexidade do conhecimento e a necessária flexibilidade para o seu desenvolvimento (de si e do outro).

3.5.6 EXPERIMENTO 6: Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial

CONHECER-NA-AÇÃO:

<i>Contexto</i>	Oferta de PFlex no curso diurno de Arquitetura e Urbanismo da UFMG no 2º semestre de 2018 (APÊNDICE N). A disciplina foi conduzida pela autora desta tese, tendo a participação de mais dois professores de projeto em orientação e processo avaliativo, e de um engenheiro de estruturas, com 15 (quinze) alunos da graduação matriculados e um aluno da pós-graduação. Os alunos de graduação variavam do 3º ao 10º período, sendo 13 (treze) alunos do curso diurno e 1 (um) aluno do curso noturno.
<i>Linguagem</i>	Proposta de conversa <i>homem-máquina-homem</i> por meio da combinação dos métodos experimental (concepção de protótipos e abordagem tectônica buscando uma análise do contexto), computacional (modelagem paramétrica no <i>Grasshopper</i> e análise estrutural no <i>plug-in Karamba</i>) e analítico (para aprendizagem e avaliação da conversão dos resultados encontrados na análise estrutural computacional).
<i>Acordo</i>	A disciplina consistiu em uma interface entre projeto, teoria das estruturas e análise estrutural computacional. O objetivo foi experimentar estratégias de investigação projetual na convergência entre a flexibilidade estrutural e a articulação espacial, problematizando as decisões espaciais em conjunto com as decisões de concepção estrutural, estando todas elas relacionadas com o contexto. Ao final, o estudante deveria ser capaz de conceber um conjunto de regras para a construção de um sistema estrutural, compreendendo de maneira prática princípios de estática da forma e das propriedades dos materiais, de tal maneira que se percebesse a relação das decisões de projeto com o processo construtivo.

Engajamento

A proposta de trabalho foi o desenvolvimento de projeto para escolas na África¹⁸³ por meio de abordagem de processo de projeção paramétrica auxiliado por *software* de modelagem paramétrico (*Grasshopper*) e análise estrutural (*Karamba*). Para tanto, a disciplina foi composta por módulos teóricos com aulas expositivas e seminários, e módulos práticos que consistiu em orientações, prototipagem, aprendizagem dos *softwares*.

As aulas expositivas buscaram fornecer aos alunos conceitos relativos ao processo de projeto e aos procedimentos de concepção estrutural. Após a aula inaugural de apresentação da disciplina, a primeira aula consistiu em uma abordagem teórica processual para o desenvolvimento de articulação espacial por meio de projeto paramétrico. Para tanto, foram apresentados 14 (quatorze) estudos de casos análogos de projeto e construção de escolas na África,¹⁸⁴ em que foram evidenciados os parâmetros socioculturais, técnicos e construtivos relacionados, buscando suscitar nos alunos a reprodução

¹⁸³ A motivação da disciplina foi a inclusão de parâmetros estruturais no desenvolvimento de um método para articulação espacial para o concurso de projetos da “KYM Field Schools”. Este projeto foi realizado anteriormente durante disciplina de PFlex ofertada pela Prof. Ana Paula Baltazar, orientado para concurso que propunha o desenvolvimento de proposta de escolas na África, a serem replicadas em uma variedade de contextos. Os alunos da disciplina consideraram ideal em vez de realizarem o desenho de um único projeto, criarem uma interface de participação por meio de um jogo, em que a articulação do espaço seria definida pelas características físicas do lugar, desejos e conhecimento construtivo das pessoas locais. Dessa maneira, o resultado final de projeto surgiria do envolvimento coletivo com o jogo, emergindo escolas específicas em atendimento ao contexto e às demandas locais (ANEXO B). A proposta de desenvolver uma disciplina que incluísse regras de comportamento estrutural no jogo criado foi inicialmente considerada, mas acabou sendo direcionada para uma abordagem de processo de projeto paramétrico, sendo direcionada para uma investigação sobre eficiência do material.

¹⁸⁴ Escola Primária em Gando, por Kéré Architecture em Burkina Faso, 2001; Anexo da Escola Primária de Gando, por Kéré Architecture, Burkina Faso, 2008; Colégio *InsideOut*, por Andrea Tabocchini & Francesca Vittorini em Yeboahkrom, Gana, 2017; Fundação Mama Sarah Obama por Kéré Architecture em Kogelo, Quênia, 2015; Escola Infantil Chipakata, por Susan Rodriguez + Frank Lupo + Randy Antonia Lott em Lusaka, Zâmbia, 2015; Escola Primária COF, por Studio FH Architects em Rakai, Uganda, 2015; Escola de Educação Infantil LAAFI, por Albert Faus em Koudougou, Burkina Faso, 2014; Escola Primária Comunitária para Meninas, por Orkidstudio em Kenema, Serra Leoa, 2016; Centro de Integração Escolar, Profissional e Esportiva por Albert Faus em Ouagadougou, Burkina Faso, 2012; Centro de Oportunidade para Mulheres por Sharon Davis Design, em Kayonza, Ruanda, 2013; Edifício Educacional em Moçambique, por Bergen School of Architecture em Kayonza, Ruanda, 2013; Gangouroubouro Primary School, por LEVS architecten em Gangouroubouro, Mali, 2013; Escola em Chuquibambilla, por AMA + Bosch Arquitectos em Chuquibambilla, Peru, 2013; Sala de Aula Multifuncional Mazaronkiari, por Marta Maccaglia + Paulo Afonso em Satipo, Peru, 2014;

do processo paramétrico por meio da imitação (APÊNDICE O).¹⁸⁵

A segunda aula teórica consistiu em uma revisão (ou apresentação) de conceitos estruturais básicos visando a capacitar os alunos a realizarem modelo de análise estrutural. Para tanto, foram vistos os conceitos de Módulo de Elasticidade (E), Módulo de Cisalhamento (G), Coeficiente de Dilatação Térmica (α), Peso Específico (γ), Tensões de Escoamento e de Ruptura (F_u). Também foram abordados de maneira qualitativa os tipos de ações incidentes nas estruturas, bem como a relação entre as ações aplicadas (compressão, tração, cortante, momento fletor e torção) e as tensões resultantes (normal de compressão, normal de tração, flambagem, cisalhamento, flexão e torção). Por fim, foram vistas as relações entre esforços atuantes e seções resistentes para auxiliar os alunos na escolha das seções transversais.

Desta maneira, conforme os conceitos abordados nas aulas teóricas, os alunos deveriam apresentar “Seminário de Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial”, em que cada grupo, composto por 3 (três) alunos, deveria pesquisar as características de um determinado país africano,¹⁸⁶ tais como o tipo de clima, as características econômicas, socioculturais e as soluções construtivas típicas, para servir como parâmetros para a articulação do espaço e o desenvolvimento de sistema estrutural mais adequados à projeção arquitetônica (ANEXO C). Após a apresentação geral dos parâmetros, cada aluno deveria desenvolver um projeto de escola para um determinado país e um determinado clima para estudo do projeto com a aplicação dos parâmetros de articulação espacial e flexibilidade estrutural selecionados. Para isso, deveria ser elaborado

¹⁸⁵ Para Schön (1987) ao imitar a *performance* do outro, o indivíduo se coloca em uma nova situação de ação, sendo que esta ação de imitação pode ser realizada pela cópia de um produto ou pela reprodução de um processo, que foi a intenção da disciplina.

¹⁸⁶ A definição do país que cada grupo iria pesquisar foi realizada por meio de sorteio, em que foram colocadas as seguintes opções: Senegal, Burkina Faso, Níger, Chade, RCA (República Centro Africana), Sudão, Etiópia, Uganda, Quênia e Somália. A proposta foi promover a maior diversificação de propostas possíveis, devido à distribuição geográfica da localização.

um protótipo físico para estudo (ANEXO D), servindo como referência para a etapa posterior de modelagem da estrutura no *software* paramétrico *Grasshopper* e análise no *plug-in* de análise estrutural paramétrico *Karamba*.

Para familiarização com o processo paramétrico computacional, foram oferecidas 3 (três) aulas práticas para o ensino do *Grasshopper*, de tal maneira que os exercícios desenvolvidos corroborassem a modelagem das estruturas. Os alunos aprenderam a modelar, em uma sequência de complexidade, vigas, pórticos, treliças planas e treliças espaciais. Esses modelos serviram de *input* para as aulas de aprendizagem do programa de análise estrutural *Karamba*, em que a abordagem também foi realizada numa gradação de complexidade.

As 4 (quatro) aulas dedicadas à análise estrutural paramétrica consistiram em instruções para a montagem do modelo por meio do conceito de concepção estrutural (REBELLO, 2000) e dos procedimentos de *input* exigidos pelo *software*. Para prática dos conceitos e procedimentos aprendidos, os alunos realizaram exercícios de análise estrutural, em que os resultados encontrados na análise computacional deveriam convergir para as soluções encontradas pelo método analítico. Esses exercícios foram realizados para vigas, pórticos, treliças planas e treliças espaciais, reproduzindo de maneira similar os exercícios realizados na disciplina *Arquitetura e Concepção Estrutural Digital*.

Após a familiarização com a análise estrutural por meio de exercícios, foi iniciada a conversa com o engenheiro de estruturas, que realizou uma apresentação relatando seu percurso de formação até o momento e as experiências na prática profissional¹⁸⁷ em que desenvolveu projetos

¹⁸⁷Participação do engenheiro de estruturas Guilherme Frederico Vaz. A graduação do engenheiro civil convidado foi em parte realizada na UFMG e em parte na *École des Ponts et Chaussées*, escola em que obteve um

de maneira cooperativa com escritórios de arquitetura, vislumbrando uma possibilidade de prática interdisciplinar. Os alunos realizaram perguntas buscando compreender como esses processos cooperativos estão ocorrendo, e como os papéis dos arquitetos e dos engenheiros são definidos nestas práticas. O engenheiro evidenciou que no Brasil ainda não havia vivenciado nenhuma experiência parecida, mas que suas experiências de formação e prática profissional no exterior permitiram que compreendesse a importância dos processos de cooperação entre arquitetos e engenheiros na prática de projeção.

Nas aulas seguintes, os alunos realizaram conversas individuais com o engenheiro, tendo sido realizadas 2 (duas) aulas com esse objetivo. A primeira, ocorrida no início do processo da modelagem, consistiu em um auxílio instrumental para configuração do modelo. Já a segunda, realizada duas semanas após, consistiu em uma conversa para encontrar soluções estruturais em seus aspectos estéticos e construtivos que concilhassem a espacialidade pretendida com os critérios de eficiência estrutural. Os alunos se engajaram com a circularidade e a recursividade propiciada pelo processo, e após as dificuldades iniciais de montagem e análise do modelo, começaram a explorar possibilidades de forma e resistência por meio da alteração dos parâmetros. Os estudantes solicitaram que a disciplina se estendesse por mais uma semana para que pudesse haver uma recursividade do processo de análise estrutural computacional com a espacialidade pretendida. Este “retorno” às considerações arquitetônicas foi realizado por meio de conversa com professora de projeto convidada.¹⁸⁸A orientação para a apresentação final do projeto foi de que os parâmetros espaciais e estruturais selecionados estivessem explicitamente evidentes na proposta. O enfoque da apresentação final

Master em Engenharia de Estruturas (2015-2018). Trabalhou como engenheiro de estruturas no escritório Thornton Tomasetti em Nova York e no escritório Schlaich Bergermann Patner em Berlim.

¹⁸⁸ Participação da professora Ana Paula Baltazar, atualmente professora adjunta do Departamento de Projetos da Escola de Arquitetura da UFMG.

deveria ser processual, uma vez que os produtos obtidos eram resultados de uma negociação dos parâmetros envolvidos.

Ação e (Trans)ação

Os parâmetros para a projeção foram definidos por grupos na ocasião do seminário. Os projetos individuais foram baseados nas características socioculturais e ambientais identificadas nos países estudados (Senegal, Níger, República Centro Africana, Sudão, Chade e Burkina Faso), em que cada aluno seguiu um caminho próprio para a realização do projeto, selecionando, dentre os parâmetros identificados pelo grupo, aqueles que consideraram mais pertinentes para as propostas individuais conforme veremos a seguir:

a) Senegal

Para o desenvolvimento dos projetos, o grupo do Senegal identificou como parâmetros fundamentais o clima, a cultura e as tipologias construtivas. O clima da região se caracteriza por uma estação seca prolongada e chuvas irregulares e mal distribuídas, e que se dividem em clima semiárido e desértico, ao norte, e tropical seco, ao sul. Com relação à organização social, as tribos se caracterizam pela fidelidade ao líder, vida social e comunitária organizada por faixa etária e pela educação se realizar nas casas comunitárias, tendo as danças tradicionais como uma forma de recreação. Com relação às construções, as características se dividem entre as que estão consolidadas em meio urbano (caráter definitivo, geralmente em concreto armado), as não consolidadas (caráter provisório, com o uso de tijolo adobe, cimento ou cerâmico), e as construções tradicionais caracterizadas pela variedade étnica, utilizando os materiais da região (madeira, bambu, pedras e adobe).

O Projeto A¹⁸⁹ (ANEXO E) foi realizado para construção na região do semiárido africano, tendo consistido em um módulo que pudesse ser combinado com diferentes articulações (FIG. 72). O processo foi orientado pela baixa disponibilidade de materiais industrializados, tendo sido escolhidos apenas materiais naturais encontrados no local, tais como a madeira, a terra e a palha. Com relação à concepção da estrutura, foi projetado pórtico inclinado, de tal forma que esse propiciasse uma variação de pé-direito, contribuindo com a circulação de ar.



FIGURA 72 – Projeto A: proposta
Fonte: arquivo pessoal da autora

¹⁸⁹ Projeto A, elaborado por Felipe Lima de Oliveira.

Por meio da confecção do protótipo (FIG. 73), o aluno buscou estudar a estabilidade da estrutura submetida a uma dupla inclinação, no sentido longitudinal e no sentido transversal. O pórtico foi projetado com barras auxiliares, e o processo foi direcionado para a otimização da solução estrutural, buscando a inclinação máxima do pórtico para a manutenção da sua estabilidade.



FIGURA 73 – Projeto A: protótipo estrutural
Fonte: arquivo pessoal da autora

A análise estrutural foi realizada para o pórtico isolado (FIG. 74) e para a combinação de 8 pórticos. Segundo o aluno, a análise do conjunto apresentou resultados de deslocamento do conjunto semelhante à do pórtico isolado, tendo demonstrado a estabilidade do módulo proposto. As seções transversais escolhidas para a barra superior do pórtico, para os pilares e para as peças secundárias foram validadas, tendo tipo uma utilização máxima de 55%.

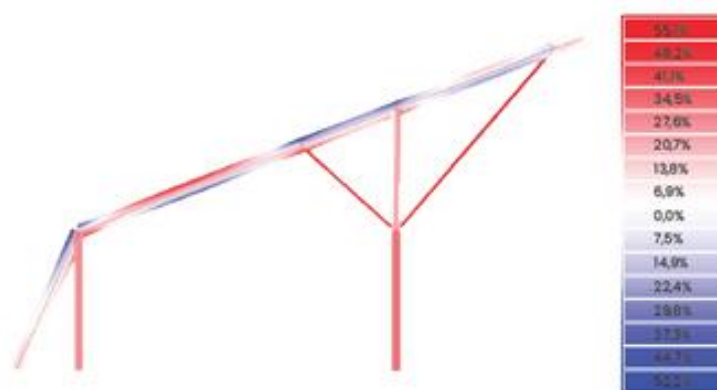


FIGURA 74 – Projeto A: análise estrutural computacional (gráfico de utilização dos perfis selecionados)

Fonte: arquivo pessoal da autora

O Projeto B¹⁹⁰ (ANEXO F) foi orientado para a articulação do espaço de tal forma que essa propiciasse um pátio interno para a prática da dança, por se tratar de uma característica sociocultural do país. A articulação espacial para a criação do pátio interno ocorreria por meio da combinação de módulos de sala de aula, sendo esses abrigados por uma cobertura independente com o objetivo de gerar um sombreamento nos espaços comuns e proteção das fachadas (FIG. 75).

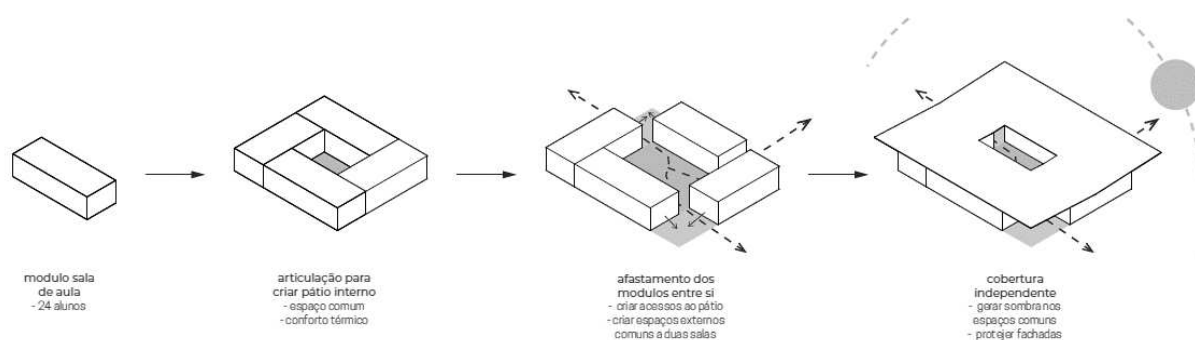


FIGURA 75 – Projeto B: diagrama de articulação espacial

Fonte: arquivo pessoal da autora

O processo de concepção estrutural desenvolvido pelo aluno também visou à validação e à otimização da estrutura inicialmente projetada. A confecção do protótipo (FIG. 76) visou a verificar a estabilidade de metade da estrutura, buscando verificar o alcance máximo das barras

¹⁹⁰ Projeto B, elaborado por Lucas Dias Franco Afonso.

metálicas para gerar balanços estruturais, propiciando o máximo possível de sombreamento para as fachadas.

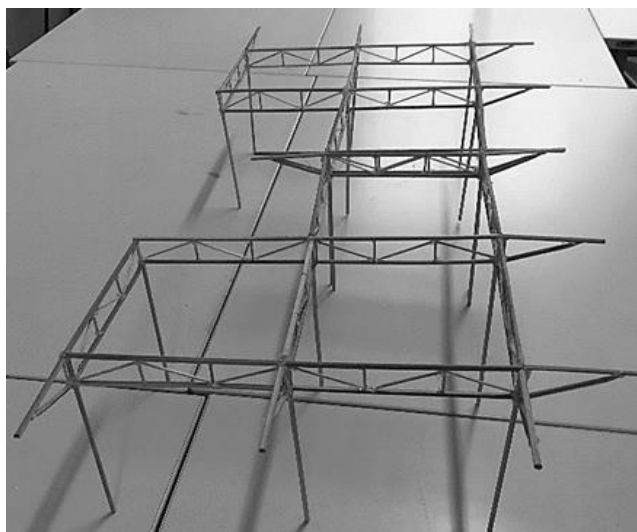


FIGURA 76 - Projeto B: protótipo
Fonte: arquivo pessoal da autora

A análise estrutural computacional teve como aspecto central a verificação dos perfis à flambagem e ao deslocamento. Na conversa com o engenheiro, o aluno se engajou em realizar a verificação por meio da análise computacional e da verificação da carga crítica de flambagem pelo método analítico. O aluno disse que se recordava de já ter tido contato com as fórmulas utilizadas nas disciplinas teóricas de estruturas, mas que não as teria utilizado caso não tivessem sido mencionadas pelo engenheiro.

O aluno relatou que o processo de análise estrutural possibilitou que houvesse uma reconfiguração da estrutura (FIG. 77). Devido à dimensão do balanço foi necessário adicionar barras internas nas extremidades da treliça com o objetivo de diminuir seu deslocamento. Já em relação à parte interna da treliça, reduziu-se o número de divisões com o propósito de otimizar a utilização das barras. A nova divisão interna da treliça resultou da distância máxima de apoio das telhas e da tentativa de otimizar o uso dos perfis. Ainda com o objetivo

de aumentar a utilização das peças, percebeu-se possível a redução do número de pilares.

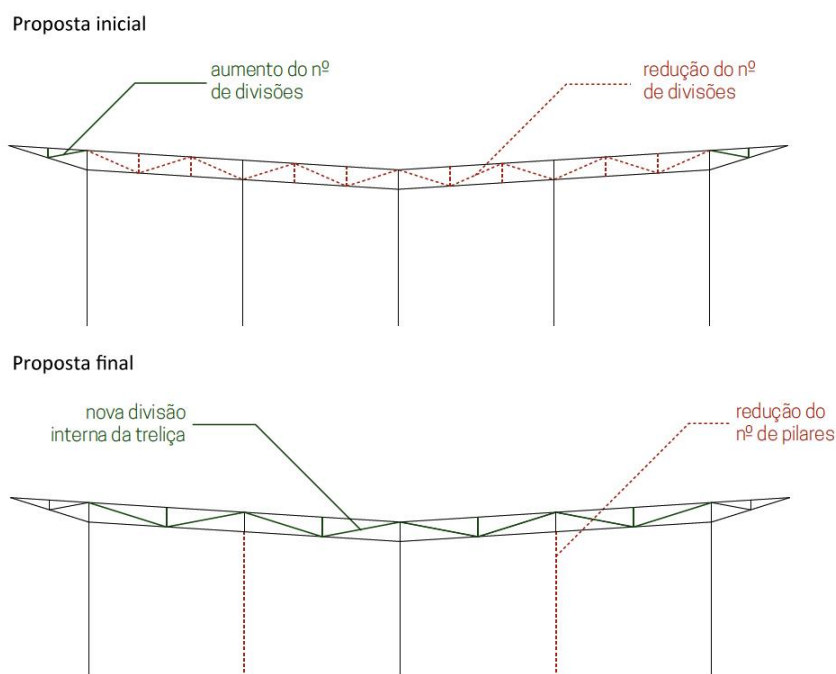


FIGURA 77 – Projeto B: proposta inicial e proposta final
Fonte: arquivo pessoal da autora

b) Níger

O grupo do Níger¹⁹¹ considerou as características climáticas do clima árido e semiárido para a proposta de soluções que atenuassem os problemas de conforto térmico e a escassez de materiais disponíveis na região. Foram identificados três potenciais materiais para uso estrutural, sendo considerado o aço (importado), a argila compactada e a areia¹⁹².

Cada aluna buscou explorar um dos materiais identificados, sendo que no Projeto C (FIG. 78, à esquerda) (ANEXO G) foram utilizados perfis

¹⁹¹ As alunas estavam matriculadas no 3º período do curso, tendo poucos conhecimentos teóricos precedentes, tanto de projeto quanto de estruturas.

¹⁹² Potencial vislumbrado pelo grupo identificado por meio da pesquisa do projeto “Dune” do arquiteto Magnus Larsson, em que através de processo biotecnológico, a areia é solidificada pela ação de uma bactéria, que assim, forma estruturas orgânicas de arenito.

metálicos; no Projeto D (FIG. 78, ao centro) (ANEXO H) a aluna explorou a combinação de aço com coberturas em abóbadas feitas com argila compactada; e, no Projeto E (FIG. 78, à direita), a aluna teve uma intenção inicial de experimentar uma proposta com o uso da areia. A primeira (Projeto C) e a segunda proposta (Projeto D) buscaram apenas a validação da estrutura projetada, buscando resultados que estivessem dentro do limite máximo de deslocamento. No entanto, a primeira proposta, que inicialmente concebeu a estrutura como a combinação de pórticos planos treliçados, verificou, por meio da análise estrutural, que para os vãos projetados não haveria necessidade de se escolher a treliça (ideal para vãos maiores), podendo a estrutura ser concebida como um sistema de pórticos (FIG. 79).

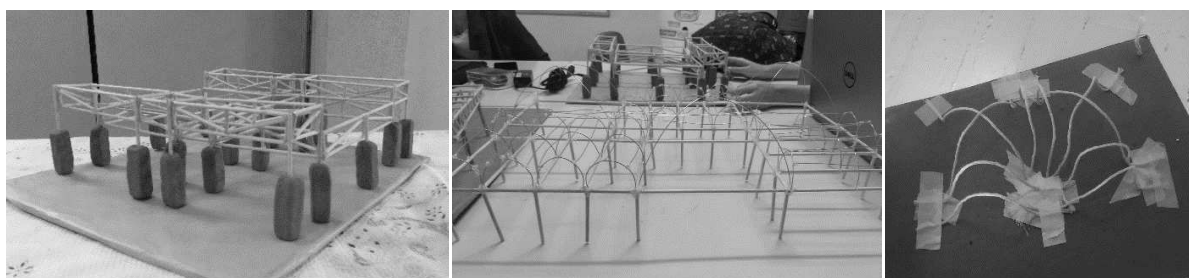


FIGURA 78 - Protótipos dos projetos C¹⁹³, D¹⁹⁴ e E¹⁹⁵

Fonte: arquivo pessoal da autora

Já a proposta do Projeto E (ANEXO I), que inicialmente visava à construção com a areia, teve que ser alterada devido à aluna não ter obtido as informações das propriedades do material, necessárias para a configuração do modelo de análise estrutural no *Karamba*. Dessa forma, a aluna alterou o parâmetro orientador, propondo a realização de uma construção que se assemelhasse às habitações em forma de tenda, tais quais os árabes nômades usam no deserto. Dessa maneira, para conceber estas estruturas foi sugerido que fosse desenvolvido processo de *form-finding* por meio da combinação do programa

¹⁹³ Projeto C, elaborado por Thais Giulia Barros da Silva.

¹⁹⁴ Projeto D, elaborado por Bruna Faria Maciel.

¹⁹⁵ Projeto E, elaborado por Milena Rezende Torino.

Karamba com o *Kangaroo*. Como material estrutural foi escolhida a madeira, configurada em ripas flexíveis como uma estrutura retrátil, coberta com adobe, palha ou tecido. Como a forma da estrutura foi encontrada pelo *Kangaroo*, já tendo como referência as cargas utilizadas no projeto, a análise do *Karamba* apenas validou a estrutura, tendo encontrado baixos valores de utilização e deslocamento máximo.

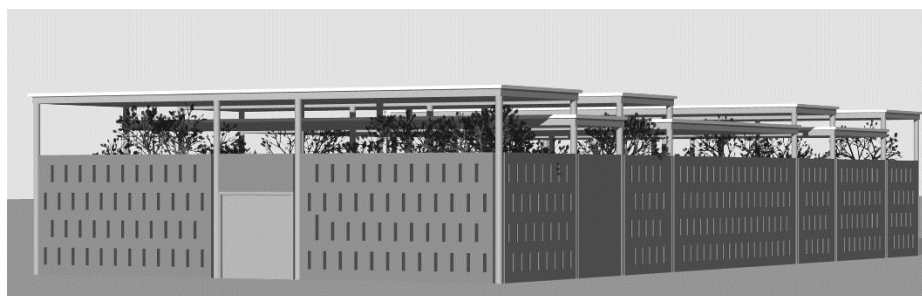


FIGURA 79 – Projeto C: proposta
Fonte: arquivo pessoal da autora

c) República Centro Africana (RCA)

A pesquisa realizada pelo grupo da República Centro Africana (RCA) revelou que existem dois climas predominantes no país, o semiárido e o quente úmido, tendo como recomendação para o semiárido o desenvolvimento de projetos com grande inércia térmica, pátios sombreados e coberturas elevadas, e para o quente úmido, o uso de grandes aberturas e beirais. Com relação aos parâmetros espaciais, identificou-se que, de acordo com a cultura, os espaços públicos devem ser completamente abertos, sem a presença de recintos, de modo que as atividades sejam visíveis para todos, inclusive para os transeuntes. Para a definição dos parâmetros estruturais, foi identificado o uso predominante de tijolos e grelhas de madeira, mas o grupo considerou que o uso de treliças metálicas ou de madeira poderia ser interessante de forma a potencializar a flexibilidade de uso.

A primeira proposta para a RCA, O Projeto F¹⁹⁶ (ANEXO II), foi direcionada para o clima quente úmido, e, dessa forma, utilizou como parâmetros o uso do telhado inclinado e beiral prolongado para escoamento de chuva e sombreamento, em que a estrutura deveria consistir de uma combinação de pórtico treliçado com treliça espacial, utilizando perfis I de aço (FIG. 80). A aluna propôs que a estrutura consistisse em uma combinação de módulos de 2 x 2 x 5m. Estes módulos deveriam se combinar de tal forma que gerassem a cobertura de grandes vãos. No entanto, na confecção do protótipo, a aluna visualizou que a dimensão dos módulos gerava flexão nas barras, o que não seria interessante para uma estrutura em treliça espacial.

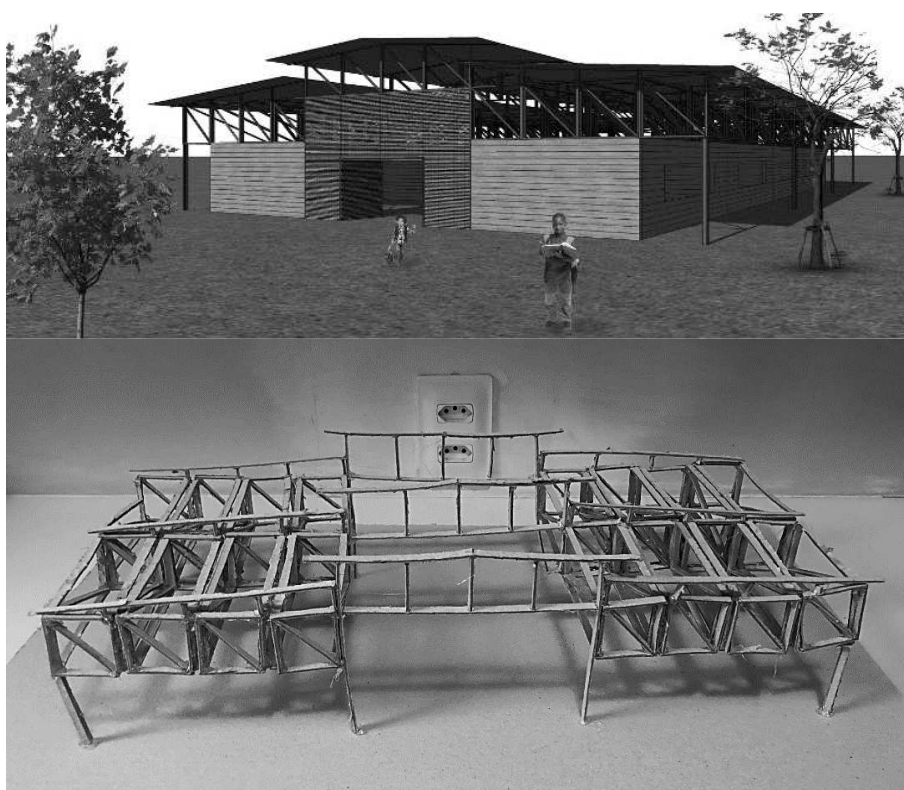


FIGURA 80 - Projeto F: proposta e protótipo
Fonte: arquivo pessoal da autora

Na análise estrutural computacional, houve uma preocupação em validar a solução adotada. Inicialmente, a aluna apresentou dificuldade em analisar a estrutura global, sendo orientada a realizar a análise por

¹⁹⁶ Projeto F, elaborado por Giovanna de Giacomo Andrade.

partes, verificando primeiramente a estabilidade dos módulos, para posteriormente realizar a análise da estabilidade da estrutura como um todo. A primeira análise se concentrou em analisar a estrutura como um pórtico plano, verificando deslocamento e utilização dos perfis. Posteriormente, foi analisado o módulo, também sendo verificado o deslocamento e a utilização dos perfis (FIG. 81).

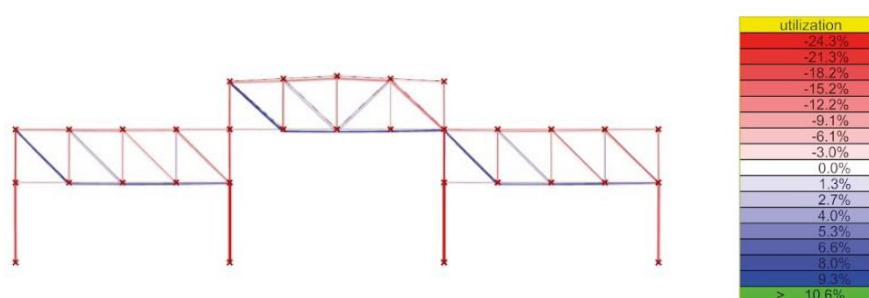


FIGURA 81 - Projeto F: análise de utilização dos perfis
Fonte: arquivo pessoal da autora

A segunda proposta, O Projeto G¹⁹⁷ (ANEXO K), também foi realizada para o clima quente e úmido, e se concentrou em realizar um projeto orientado para soluções de arquitetura bioclimática, utilizando materiais naturais tais como madeira e cobertura em palha. A tipologia estrutural deveria propiciar a circulação do vento na parte superior, de tal forma a retirar a concentração do vento quente, buscando atenuar a sensação de constante calor e clima abafado, provocado pela alta umidade. O protótipo realizado mostrou que a solução vislumbrada para a tipologia estrutural era válida, uma vez que este ficou completamente rígido e estável (FIG. 82).

¹⁹⁷ Projeto G, elaborado por Roberto Pinto Osório.

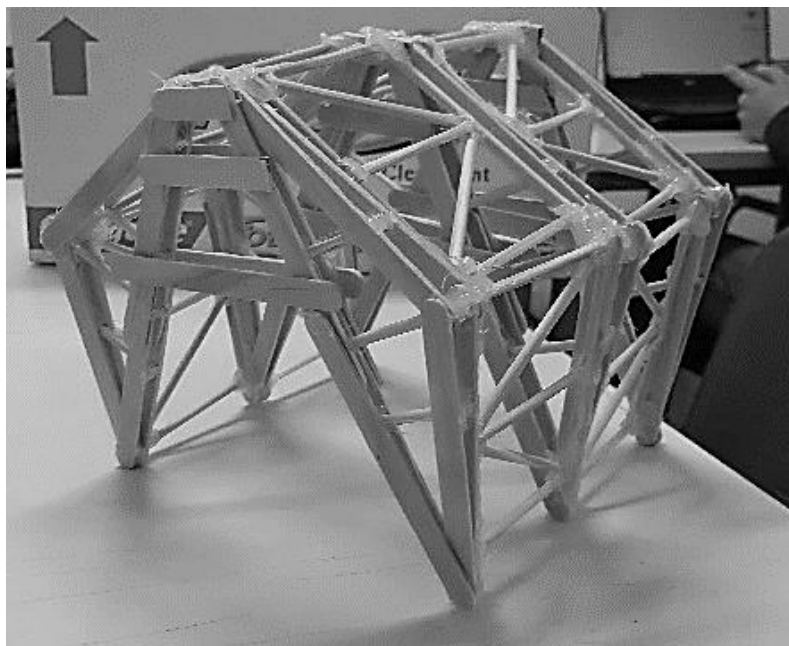


FIGURA 82 - Projeto G: protótipo
Fonte: arquivo pessoal da autora

O trabalho realizado com a análise computacional foi o de validar a escolha dos materiais e das seções transversais. O aluno encontrou na primeira análise resultados muito baixos de utilização, o que significou que a estrutura estava sendo pouco solicitada às ações incidentes, podendo haver um redimensionamento de perfis. Sendo assim, o aluno se engajou a buscar uma redução nas seções transversais, que estavam superdimensionadas, buscando evitar o desperdício de material. No entanto, identificou que uma redução muito grande na seção transversal gerava flexão nas peças, o que também poderia causar problemas para manuseio e instalação devido à facilidade de ruptura. Na conversa com o engenheiro de estruturas, o aluno demonstrou uma dúvida com relação à análise estrutural: se consideraria todos os nós rotulados conforme a análise de uma treliça, ou se consideraria os nós rígidos e analisaria como pórtico. O engenheiro mostrou a implicação que os dois caminhos levariam, e, ao final, foi decidido que a estrutura seria analisada como uma combinação de pórticos treliçados, tendo encontrado resultados satisfatórios para utilização e deslocamento.

A terceira proposta, O Projeto H¹⁹⁸ (ANEXO L), buscou explorar os espaços abertos, propiciando grande permeabilidade visual. Dessa forma, a aluna escolheu treliças planas para vencer os vãos, possibilitando, além disso, gerar grandes beirais. Para a escolha do material, a aluna relata que devido à escassez de recursos do país, a primeira opção seria o uso da madeira, porém, em suas pesquisas identificou que a região tem um sério problema com a presença de cupins, o que a fez redirecionar sua escolha para o uso do aço em perfis tubulares. No protótipo (FIG. 83), a aluna pôde verificar a necessidade de contraventamento da cobertura para as conformações trapezoidais decorrentes da curvatura desejada para a articulação do espaço. Dessa maneira, a motivação inicial para a realização da análise computacional foi de verificar a necessidade deste contraventamento, além da intenção de diminuir as seções transversais inicialmente escolhidas.

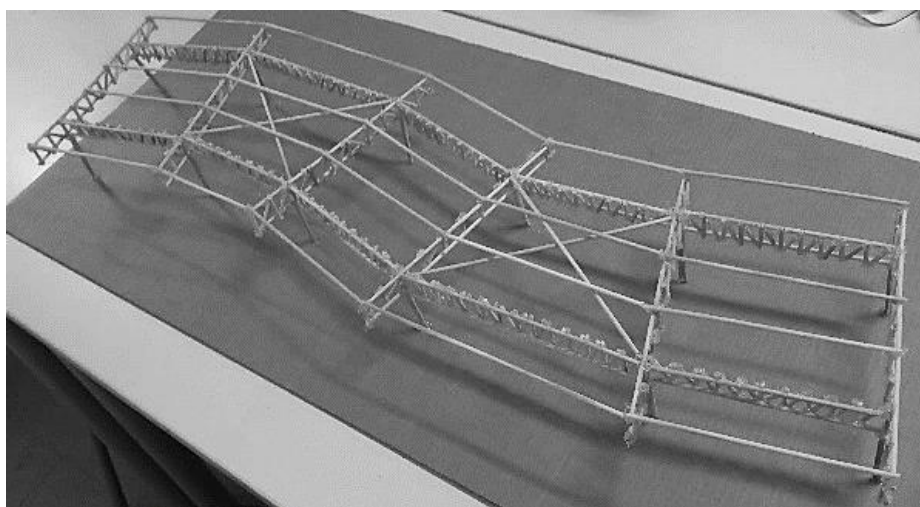


FIGURA 83 - Projeto H: protótipo
Fonte: arquivo pessoal da autora

A aluna teve certa dificuldade e uma grande ansiedade com relação ao processo de modelagem paramétrica e análise. Para que isto não prejudicasse o processo de aprendizagem, a aluna foi orientada a realizar a análise por partes, de tal maneira que fosse possível identificar o comportamento da estrutura de forma local, sendo esse

¹⁹⁸ Projeto H, elaborado por Jessica Matos Rodrigues.

procedimento comumente utilizado por engenheiros para a análise de estruturas complexas. Essa orientação diminuiu a ansiedade da aluna, que conseguiu realizar essa análise local de tal maneira que não teve maiores dificuldades, o que a motivou a prosseguir com a tentativa de realizar a análise global da estrutura. Dessa forma, a aluna saiu de um processo circular praticamente destrutivo para um processo circular recursivo, de tal maneira que a modelagem e a análise por partes separadamente possibilitaram que ela percebesse os erros que estavam sendo cometidos na modelagem do modelo da estrutura global. A análise global foi realizada com sucesso, o que permitiu uma redução significativa nas seções transversais já projetadas.

d) Sudão

O grupo do Sudão trabalhou em propostas similares orientadas para o clima árido, de tal maneira que a estrutura fosse pensada para constituir-se como abrigo. Em ambos os projetos, os alunos escolheram utilizar a estrutura metálica, tendo sido a primeira proposta concebida em uma tipologia de treliça e a segunda em um sistema de viga-pilar. A primeira proposta Projeto I,¹⁹⁹ (ANEXO M) gerou um protótipo que combinava fio metálico e barbante, de tal maneira que fosse possível identificar onde seria necessário posicionar os contraventamentos de modo que a estrutura adquirisse estabilidade (FIG. 84). O protótipo instruiu o aluno na proposição da tipologia estrutural, tendo sido utilizada a análise computacional apenas para validação da geometria e dos perfis selecionados. Os alunos deste grupo não se engajaram na recursividade propiciada pelo processo, tendo considerado o processo de análise e validação da estrutura satisfatória, não tendo realizado uma busca pela otimização da estrutura por meio da diminuição de elementos ou redução de seção transversal dos perfis.

¹⁹⁹ Projeto I, elaborado por Victor Catão Ferreira de Moraes.

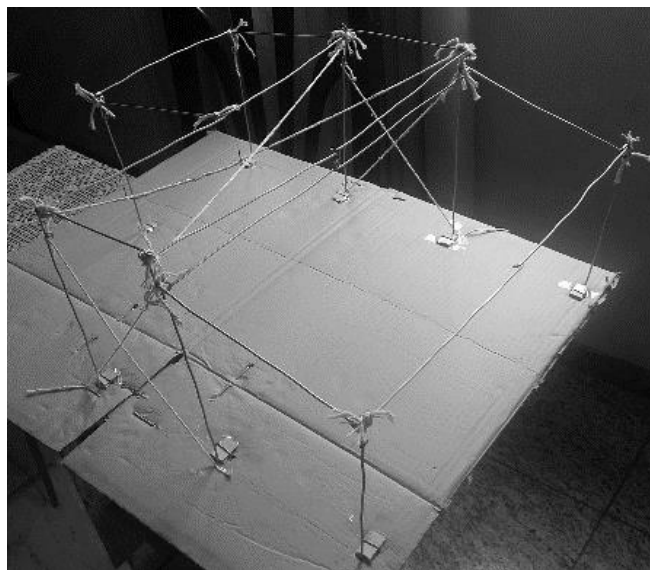


FIGURA 84 - Projeto I: protótipo
Fonte: arquivo pessoal da autora

e) Chade

As propostas realizadas pelo grupo que pesquisou o Chade voltaram-se para uma analogia das soluções vernaculares presentes no país. A primeira proposta, o Projeto J²⁰⁰ (ANEXO N) foi orientado para a porção norte do país, caracterizado pelas altas temperaturas e pela precipitação escassa. Devido à escassez de recursos no local, a aluna considerou o uso de estrutura leve com perfis tubulares em aço, de tal maneira que pudesse ser montada em ausência de energia elétrica. Para propiciar o conforto térmico do ambiente, a aluna explorou o uso do superadobe para a cobertura, o que possibilitaria o engajamento da mão de obra local na construção da escola. O protótipo foi utilizado para verificar a estabilidade da proposta, simulando inclusive o carregamento do superadobe aos quais os perfis estariam submetidos. Dessa maneira, a análise estrutural se concentrou em verificar a distribuição dos esforços e a utilização dos perfis, tendo sido encontrado um resultado satisfatório na primeira análise (FIG. 85).

²⁰⁰ Projeto J, elaborado por Luiza Von Kirchof Laurent.

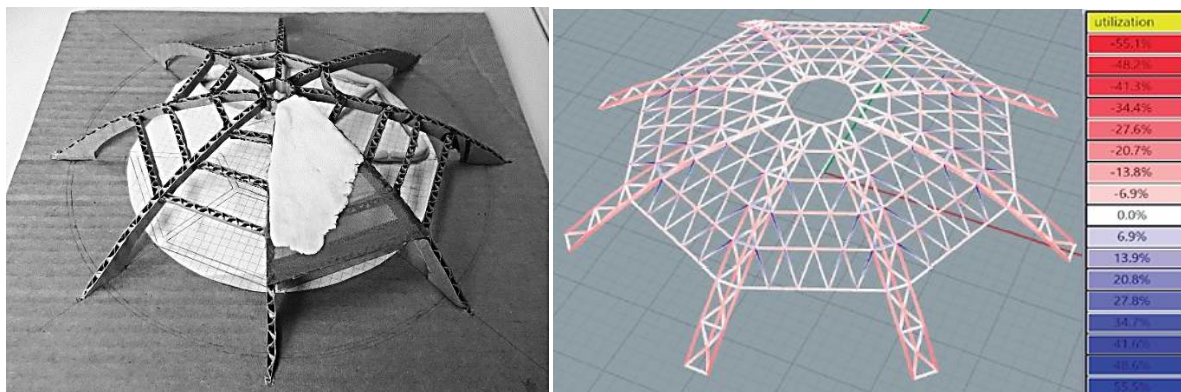


FIGURA 85 - Projeto J: protótipo (à esquerda) e análise estrutural computacional (à direita)
 Fonte: arquivo pessoal da autora

A segunda proposta, o Projeto K²⁰¹ (ANEXO O), experimentou a solução de uma estrutura para ser utilizada pela população nômade, de tal forma que fossem desenvolvidos módulos desmontáveis e integrados, devendo se conformar como um sistema estrutural leve, de fácil montagem e desmontagem, de tal forma que a estrutura pudesse ser carregada pelos próprios usuários (FIG. 86). A aluna não chegou a desenvolver protótipos e utilizou a análise apenas para validação da estabilidade. No entanto, compreendeu que poderia ter explorado mais o processo, tendo se engajado na recursividade propiciada.



FIGURA 86 - Projeto K: proposta estrutural
 Fonte: arquivo pessoal da autora

²⁰¹ Projeto K, elaborado por Michelle Marques de Oliveira Carvalho.

f) Burkina Faso

O grupo de Burkina Faso²⁰² apresentou três propostas diversas. O grupo identificou duas zonas climáticas principais no país, sendo ao norte, a predominância do clima semiárido, e, ao sul, o clima similar ao tropical quente úmido. Embora o grupo tenha identificado a elevada pobreza do local, as propostas não foram orientadas para a escassez de recursos, mas pela expressividade da forma arquitetônica. O grupo chegou a mencionar que seria difícil desenvolver propostas originais para Burkina Faso, uma vez as propostas do arquiteto africano Francis Kéré, vistas na primeira aula, já abarcavam soluções arquitetônicas exemplares. Dessa maneira, o que se notou é que o grupo desenvolveu uma relação de autoria, buscando uma condição formalista para o projeto desenvolvido.

A primeira proposta, o Projeto L²⁰³ (ANEXO P), demonstrou desde o princípio a intenção de explorar a concepção de uma estrutura em *Diagrid* utilizando madeira. Com base em referências de imagens de estruturas do tipo, a aluna desenvolveu um desenho para a estrutura e posteriormente pensou em como esta estrutura poderia se adequar à construção da escola. Para tanto, a confecção do protótipo buscou estudar a expressividade da forma, bem como sua estabilidade. Com relação à análise computacional, a aluna teve a intenção de verificar se seria possível colocar lajes intermediárias, conformando mezaninos. Esta proposta gerava a necessidade de perfis de seção transversais consideravelmente maiores do que as inicialmente pré-dimensionadas, o que levou a aluna a reconsiderar a proposição de mezaninos. Dessa maneira, foi realizado um ajuste na geometria, uma vez que seria constituído de pavimento único, tendo reorientado o processo de

²⁰² As alunas do grupo estavam matriculadas no 9º período, já tendo cursado todas as disciplinas de projeto e estruturas.

²⁰³ Projeto L, elaborado por Luisa Fiuza Caporali de Oliveira.

análise estrutural para a projeção de uma estrutura autoportante, em que buscou otimizar os perfis de tal forma que a utilização estivesse o mais próximo possível do limite admissível, que conforme orientado, deveria chegar ao limite de 70% (FIG. 87).

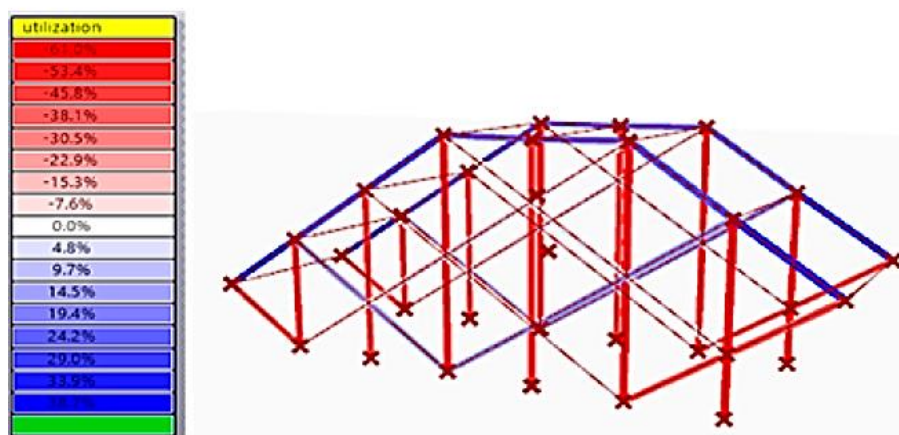


FIGURA 87 - Projeto L: análise estrutural computacional
Fonte: arquivo pessoal da autora

A segunda proposta realizada, o Projeto M²⁰⁴ (ANEXO Q), buscou explorar o desenvolvimento de uma estrutura do tipo *gridshell*, uma vez que este tipo de estrutura era o que mais se aproximava das soluções vernaculares locais. A articulação do espaço, a forma estrutural foi pensada de tal maneira que se constituísse como um abrigo que possibilitasse um microclima para a disposição de módulos para salas de aula, gerando espaços sombreados de circulação e uso coletivo. Para estudo inicial da forma por meio de protótipo, a aluna cortou fios metálicos que foram soldados nos nós. Esta forma inicialmente estudada tinha recortes nas barras, não se constituindo necessariamente como um *gridshell* (FIG. 88).

Para a simulação computacional, a aluna buscou reproduzir a forma do protótipo, mas encontrou uma dificuldade inicial em modelar a forma

²⁰⁴ Projeto M, elaborado por Marina de Faria Souza.

parametricamente. Dessa maneira, foi orientada a se engajar em um processo de *form-finding* utilizando o programa *Kangaroo*. A forma encontrada no *software* não tinha a conformação desejada pela aluna, que ficou algumas aulas tentando ajustar a forma encontrada no *Kangaroo* à geometria projetada. Após muitas tentativas frustradas, a aluna se rendeu à forma encontrada no processo de *form-finding*, uma vez que essa foi a única validada na análise estrutural do *Karamba*, repensando as estratégias de articulação do espaço.

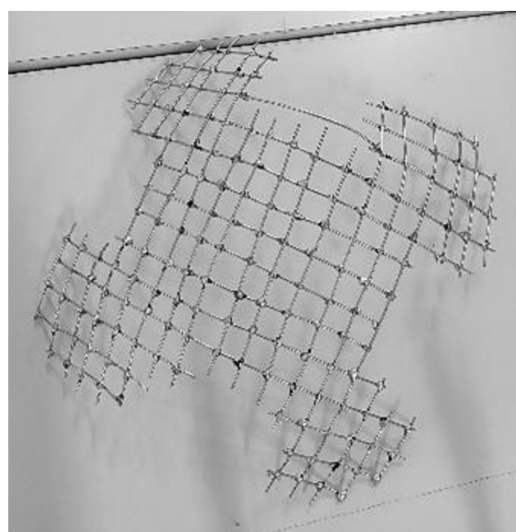


FIGURA 88 - Projeto M: protótipo
Fonte: arquivo pessoal da autora

A última proposta, o Projeto N²⁰⁵ (ANEXO R), também teve um caráter formalista, em que a aluna buscou primeiramente a expressividade da forma projetada por meio da ornamentação estrutural. A proposta se constituía de pórticos compostos por treliças planas curvas apoiadas por pilares também curvos de seção variável. Para a construção do protótipo (FIG. 89), a aluna realizou o corte dos pilares em máquina de fabricação digital, de tal maneira que fosse reproduzida precisamente a curvatura pretendida. Embora a aluna não tenha identificado haver produção de madeira laminada colada no contexto, a proposta de projeto foi orientada para o uso deste material nos pilares.

²⁰⁵ Projeto N, elaborado por Ana Flor Lages Rezende.

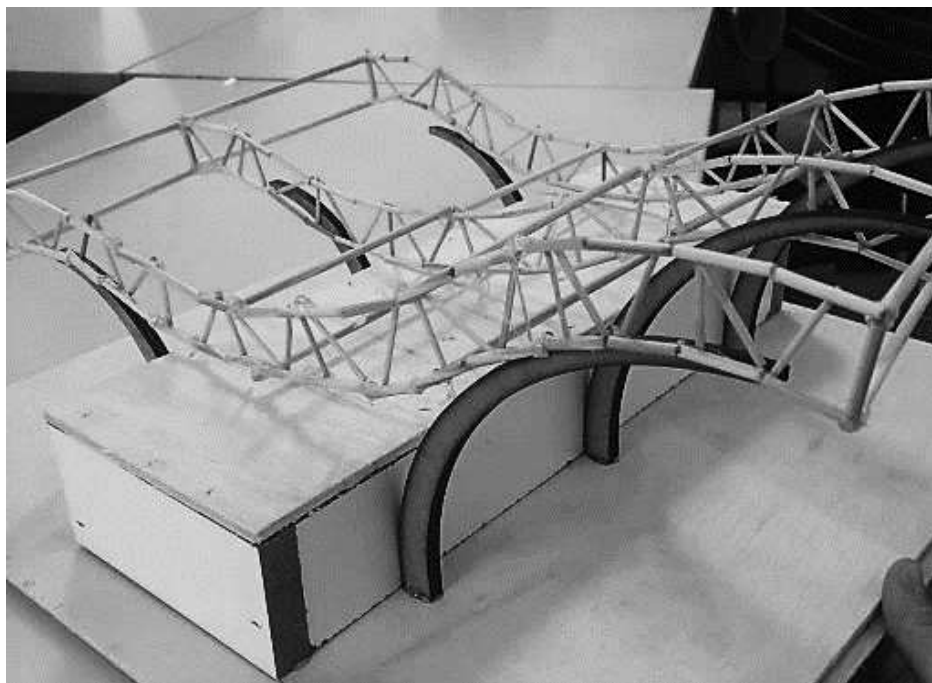


FIGURA 89 - Projeto N: protótipo
Fonte: arquivo pessoal da autora

A análise estrutural serviu para validar a estrutura pretendida, concentrando-se principalmente na avaliação da estabilidade dos pilares. O pilar de menor comprimento e menor curvatura foi validado na primeira análise, no entanto, o pilar mais alto e com maior curvatura apresentou problemas de deslocamento e utilização da seção, tendo sido considerado instável. Após uma série de alterações na geometria desse pilar e da seção transversal, a forma proposta só foi validada localmente e globalmente tendo o pilar uma seção transversal extremamente robusta, o que não reproduzia a leveza estética pretendida (FIG. 90).



FIGURA 90 – Projeto N: proposta final
Fonte: arquivo pessoal da autora

REFLEXÃO-NA-AÇÃO:

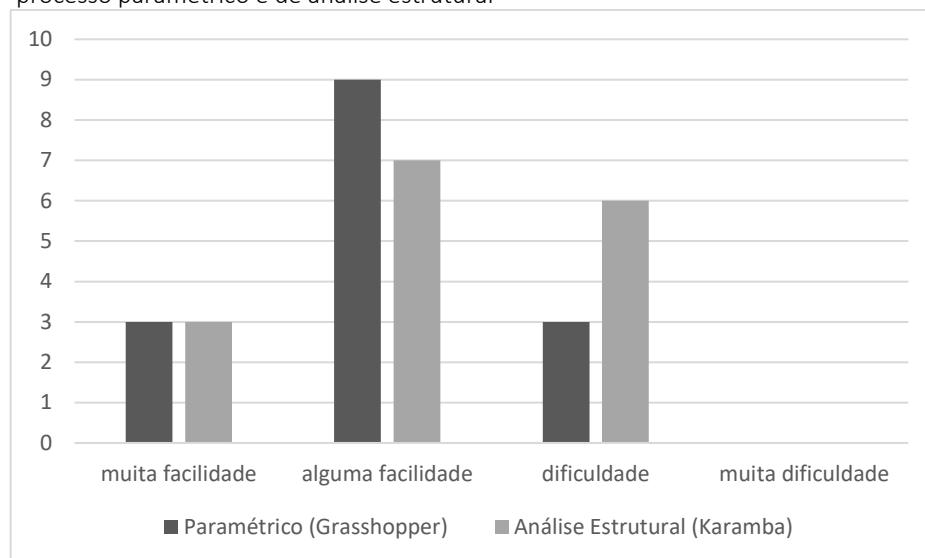
Objetivos

Os projetos desenvolvidos pelos alunos apresentaram processualmente uma convergência entre a flexibilidade estrutural e a articulação espacial, de tal maneira que as decisões espaciais foram problematizadas em conjunto com as decisões de concepção estrutural. O processo de projeção paramétrica possibilitou que a negociação de parâmetros ocorresse de maneira circular, havendo uma interação e iteração no processo, corroborando o objetivo da disciplina.

Processo

Em questionários aplicados ao final da disciplina (APÊNDICE P), foi realizada uma série de perguntas relacionadas à percepção dos alunos com relação ao processo desenvolvido e às ferramentas computacionais utilizadas. Quando questionados sobre o contexto, 10 (dez) alunos disseram considerar o ambiente do PFlex muito adequado para a aprendizagem de análise estrutural computacional, e os 5 (cinco) restantes consideraram adequado. Sobre a facilidade com relação à aprendizagem do processo paramétrico e do *software Grasshopper*, e da análise estrutural por meio do *Karamba*, as respostas variaram da seguinte maneira:

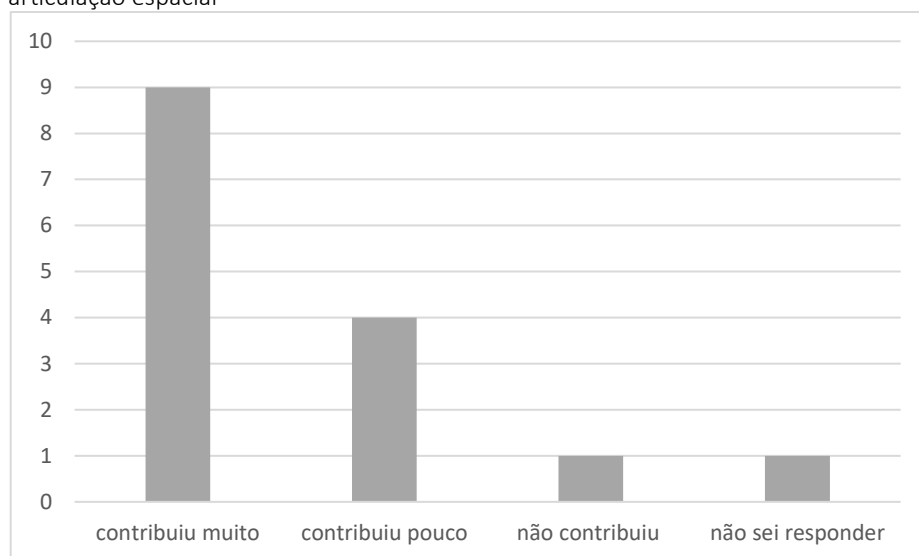
GRÁFICO 02 - Percepção dos alunos com relação ao processo de aprendizagem do processo paramétrico e de análise estrutural



Fonte: elaboração da autora

Com relação à participação do engenheiro de estruturas no processo, a maioria das respostas variaram entre muito necessária (9 alunos) e necessária (4 alunos), tendo 2 (dois) alunos considerado pouco necessária e 1 (um) aluno não soube responder, já que não havia comparecido às aulas de orientação com o engenheiro. O interessante desta resposta é que alguns alunos que confirmaram a necessidade da participação do engenheiro não chegaram a conversar individualmente, mas sentiram que a presença do engenheiro no contexto validou o processo interdisciplinar. A última pergunta relacionada à percepção dos alunos questionou se o processo paramétrico e de análise estrutural havia contribuído para a articulação espacial do projeto desenvolvido tendo as respostas variado da seguinte forma:

GRÁFICO 03 - Percepção dos alunos com relação à contribuição do processo para a articulação espacial



Fonte: elaboração da autora

Alguns alunos fizeram comentários com relação a esta pergunta, tendo um aluno declarado que a análise estrutural auxiliou na justificativa da forma, tendo tornado o projeto “mais completo, mais autêntico e condizente com a realidade”. Após a avaliação da percepção do processo, os alunos foram perguntados se fariam outras disciplinas com o mesmo formato, devendo justificar esta resposta. Todos os alunos responderam que gostariam muito de cursar outra disciplina com este formato, tendo tido uma variação de justificativas para esta resposta. A maioria enfatizou a possibilidade de projetar o espaço conjuntamente com a estrutura, possibilitando, segundo uma das respostas, “chegar a um resultado formal e estrutural que não seria possível com outras abordagens”. Outros alunos destacaram a aprendizagem da análise estrutural computacional como um facilitador para desenvolver a capacidade de pensar a estrutura e projetá-la de maneira mais eficiente. E, ainda, houve respostas que destacaram a possibilidade gerada pelo processo para sua abertura para potenciais diálogos.

Com relação aos conceitos que gostariam de se aprofundar mais em

uma próxima disciplina, a resposta unânime foi a exploração do processo paramétrico. Alguns alunos destacaram que o processo de análise estrutural atrelado ao processo paramétrico foi “muito prático” e propiciou que este fosse mais “fluido”, uma vez que “testar a solução ficou tão fácil quanto modelá-la”.

Linguagem

A conversa *homem-máquina-homem* foi fundamental para a consolidação do processo. O *software* de análise estrutural paramétrico possibilitou que a recursividade no processo de análise, síntese e avaliação ocorresse de maneira interativa e sem perda de informação por questões relacionadas à interoperabilidade. Já a conversa com o engenheiro de estruturas foi importante não só pela cooperação técnica, mas por desenvolver uma confiança nas soluções estruturais apresentadas na proposta de projeto arquitetônico. Além disso, a conversa desenvolvida permitiu que os alunos vislumbassem uma relação com o engenheiro diferente das relações de monólogo suscitadas pelo ensino vigente.

Meios

A modelagem paramétrica foi fundamental para a circularidade do processo. A análise estrutural inserida no mesmo ambiente da modelagem paramétrica facilitou o processo, possibilitando a visualização instantânea das interações realizadas com a *performance* estrutural, não tendo ocorrido problemas relacionados à interoperabilidade. Com relação ao desenvolvimento do processo de análise estrutural, o que foi notado é que a diferença entre os alunos com conhecimentos básicos de estruturas e alunos com conhecimentos intermediários e avançados não foi percebida, assim como constatado no Experimento 2, tendo todos demonstrado habilidade de realizar o modelo e avaliar os resultados da análise. A conversa *homem-máquina-homem* foi bastante importante neste processo, não só pelos aspectos técnicos, mas por ter propiciado o desenvolvimento de um novo tipo de relação com o engenheiro de estruturas.

A diversidade das propostas apresentadas demonstrou que a orientação processual da disciplina foi realizada, tendo sido bastante satisfatório tanto para os alunos quanto para os professores envolvidos. No entanto, um aspecto não foi possível de se realizar, apresentando grande potencial para outros experimentos. Durante o processo, alguns alunos solicitaram que fosse realizada uma integração com o laboratório de materiais ou com um canteiro experimental, demonstrando o desejo de experimentar novos materiais, testando e experimentando suas possibilidades de aplicação estrutural. Este processo permitiria que o projeto desenvolvido fosse orientado pelo material desenvolvido. Esta articulação não foi possível, mas demonstrou que intuitivamente o processo os levou a um raciocínio projetual orientado para uma prática material.

3.5.7 EXPERIMENTO 7: Arquitetura High-Low

CONHECER-NA-AÇÃO:

<i>Contexto</i>	Orientação de Trabalho Final de Conclusão de Curso de aluno ²⁰⁶ do curso diurno da UFMG durante o 2º semestre de 2017 e o 1º semestre de 2018, cujo interesse inicial foi desenvolver processo paramétrico com enfoque na <i>performance</i> estrutural (ANEXO S).
<i>Linguagem</i>	Conversa <i>homem-máquina-homem</i> utilizando método computacional (<i>software</i> paramétrico <i>Grasshopper</i> e os plugins <i>Milipede</i> e <i>Scan&Solve</i>) e método experimental (fundamentação prática por meio de oficinas, confecção de formas, produção de protótipos e ensaios do material).
<i>Acordo</i>	Experimentar processo de projeto explorando tecnologias digitais no campo da arquitetura e engenharia, investigando sua contribuição para o estabelecimento de conexão entre a universidade e a indústria da construção civil para o desenvolvimento de processos e de produtos.
<i>Engajamento</i>	Desenvolvimento de projeto baseado em <i>performance</i> por meio de abordagem <i>high-low</i> ²⁰⁷ , explorando alternativas para investigar a versatilidade do bloco de concreto como componente construtivo, fazendo uso da modelagem digital paramétrica como ferramenta para gerar a forma e simular o desempenho. Para isso, a proposta inicial era desenvolver fôrmas para produção de módulos construtivos de concreto que combinados desempenhassem papel estrutural, de vedação ou ambos, levando em conta as questões de versatilidade de

²⁰⁶ Trabalho elaborado por Lucas Duarte Martins, aluno de graduação da Universidade Federal de São João Del Rey, em programa de mobilidade estudantil na UFMG. O aluno também participou do experimento “Arquitetura e Concepção Estrutural Digital”, tendo esta disciplina o motivado a desenvolver o trabalho orientado para *performance* estrutural.

²⁰⁷ O termo “*high*” se refere à alta especificidade técnica envolvida na utilização de *softwares* para modelagem e análise computacionais e o “*low*” se refere ao baixo nível de conhecimento prévio necessário de quem utilizará a tecnologia desenvolvida, bem como ao material empregado em sua produção, que deve ser de fácil acesso (MARTINS; BORGES, 2018).

uso e eficiência estrutural incorporadas como parâmetros de avaliação durante o processo de criação para testar sua resistência e adaptabilidade. A hipótese era que por meio da produção das fôrmas, os blocos poderiam ser produzidos no canteiro, e até mesmo pelos próprios usuários em processos de autoconstrução.

Ação e (Trans)ação A realização desse estudo se deu em 3 (três) etapas, constituindo-se de uma primeira etapa para experimentação de diferentes métodos construtivos; a segunda, para o desenvolvimento de processo de projeto baseado em *performance*; e a terceira, para a produção das fôrmas e realização dos ensaios físicos para teste de geometria e comportamento do material. Estas três etapas deveriam se constituir como um processo circular e recursivo de concepção, análise e teste físico da proposta desenvolvida.

Para a experimentação de diferentes métodos construtivos, foram realizadas 3 (três) oficinas de experimentações práticas de construção. A primeira oficina realizada foi ministrada por uma integrante do coletivo *Alborde*²⁰⁸ durante a XXI Semana de Arquitetura da PUC Minas, que tratou das relações que se dão no canteiro de obras e como arquitetos podem intervir buscando novas relações entre projeto, execução e uso; entre quem projeta, quem constrói e quem utiliza. A segunda experimentação foi realizada durante uma oficina ministrada pelo grupo *Ateliê Américas*,²⁰⁹ cujo objetivo era explorar a capacidade de combinação do tijolo cerâmico para produção de uma trama sem local ou função definido, explorando diferentes graus de permeabilidade. E a terceira oficina realizada foi uma proposição do

²⁰⁸*Alborde* é um coletivo equatoriano que realiza projetos empregando processos participativos, trabalhando com orçamentos enxutos, materiais reutilizados e reutilizáveis e geralmente conta com a participação de alunos, proprietários e comunidades organizadas nas etapas de concepção e execução de suas obras. Alguns de seus projetos não partem de um desenho, mas do modo de execução e dos recursos com os quais serão construídos.

²⁰⁹ O *Ateliê Américas* é um grupo de pesquisa da UFMG criado em 2017 com o intuito de conhecer e reconhecer a arquitetura que vem sendo produzida nos países latino-americanos.

grupo SMiA,²¹⁰ cujo objetivo era criar estruturas que possuísem certos graus de transformação e movimentação. A realização destas oficinas serviu como referência para explorar novos métodos de projeção e execução, tendo auxiliado na compreensão de algumas problemáticas construtivas a serem consideradas no desenvolvimento do projeto.

Na segunda etapa, foi desenvolvido modelo digital paramétrico, em que, para a definição dos parâmetros geométricos do bloco, realizou-se um processo inicial de geração da forma (*form-finding*) baseado na eficiência do material, empregando o recurso de otimização topológica pelo *plug-in Milipede*, cujo desenho do bloco partiu de uma análise prévia do comportamento de um prisma retangular sob forças de compressão simples (FIG. 91). A partir da otimização topológica de um volume submetido a cargas verticais (ora cargas pontuais, ora cargas distribuídas), variando a localização de seus apoios, foi possível reconhecer um padrão de distribuição do material responsável por garantir sua estabilidade estrutural. A partir da identificação desse padrão, os resultados obtidos serviram como referência para o desenho dos blocos, para então serem submetidos à análise de elementos finitos.

²¹⁰ O grupo *Structural Morphology in Architecture* (SMiA) é um grupo composto por arquitetos pesquisadores da Universidade Técnica da Catalunha, cuja investigação centra-se na morfologia estrutural e no funcionamento de estruturas leves, explorando estratégias de projeto por meio de modelagem paramétrica e fabricação digital.

Legenda

- Apoios
- Carregamentos
- Resultados para esforços no eixo Z (cargas verticais)

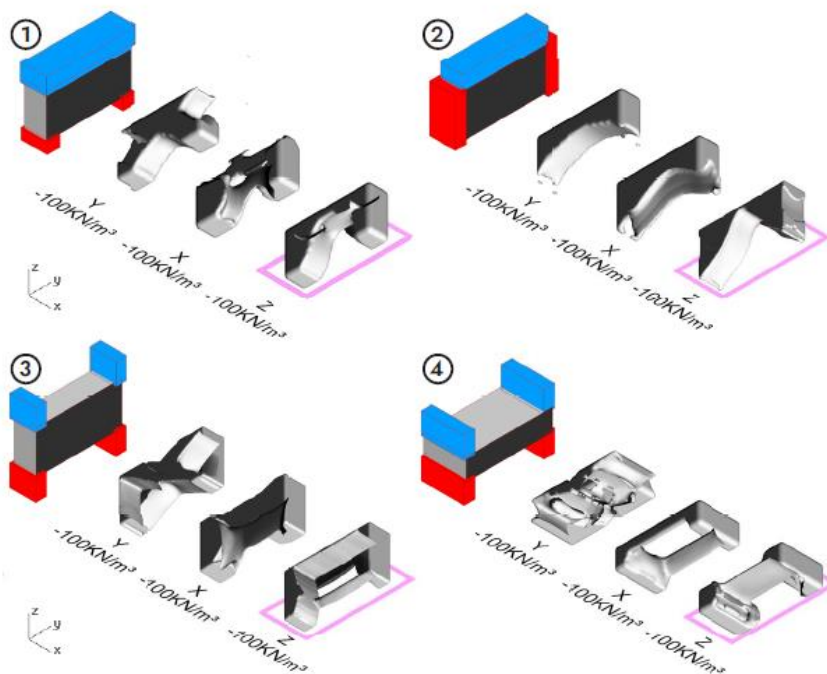


FIGURA 91 - Resultado da otimização topológica
Fonte: MARTINS, 2018.

Diferentemente do intuito inicial da proposta, que era desenvolver apenas um bloco, o estudo prosseguiu investigando o desempenho de quatro blocos diferentes (FIG. 92) para comparar os seus respectivos desempenhos, tanto em análise pelo *software* quanto nos ensaios experimentais. As alternativas variaram tendo em vista os diferentes tipos de encaixes que a combinação dos blocos poderia propiciar (FIG. 93).

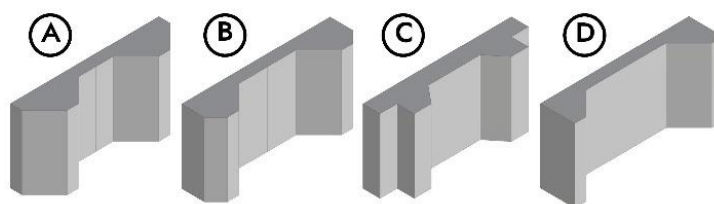


FIGURA 92 - Blocos tipo A, B, C e D, respectivamente
Fonte: MARTINS, 2018.

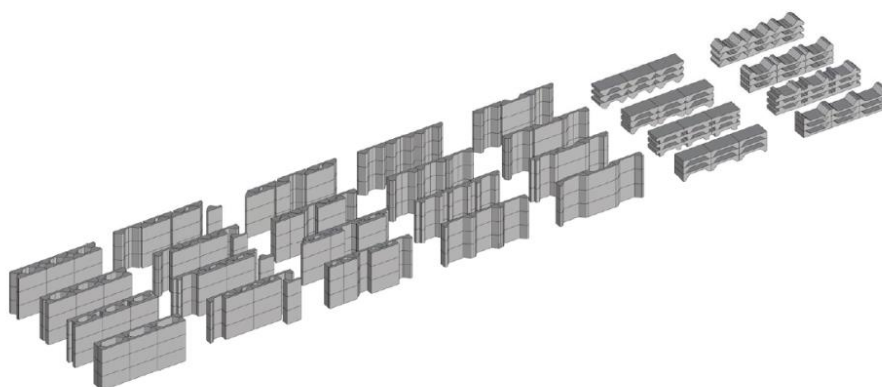


FIGURA 93 - Variedade de combinações dos blocos
Fonte: MARTINS, 2018.

A partir das geometrias iniciais, foram feitos testes computacionais de *performance* estrutural utilizando o *plug-in Scan&Solve*. O método de análise empregado permitiu visualizar as transformações resultantes da aplicação das cargas nos blocos como as tensões, deformações e deslocamentos. Dessa maneira, foi possível iniciar um processo de análise iterativo, permitindo explorar conformações espaciais distintas, e como as alterações de geometria acarretavam um melhor ou pior desempenho estrutural. Foi possível verificar, ainda, como os elementos se comportariam em diferentes situações de utilização (como peça cheia ou vazada), bastando apenas alterar sua posição em relação ao eixo horizontal e redefinindo seus pontos de apoio e de aplicação da carga.

Após os testes de *performance* do bloco por meio de simulação computacional, iniciou-se a terceira etapa, que consistiu em elaborar e produzir as fôrmas para fabricação do bloco. Para a produção das fôrmas, pretendia-se inicialmente fabricá-las utilizando impressão digital ou fresadoras CNC, partindo do pressuposto de que esta tecnologia supostamente pode estar acessível para qualquer usuário sem passar por processos industriais e mercadológicos. No entanto, após contatar empresas e universidades que oferecem esse tipo de serviço em Belo Horizonte, foi possível perceber que a demanda de

produção de objetos de dimensões iguais ou superiores a 20 x 20 x 40 cm é difícil de ser atendida com as máquinas disponíveis atualmente. Além do tempo de produção demasiado longo necessário para a produção de protótipos, essas alternativas se tornaram inviáveis pelo custo financeiro requerido. Mesmo com a sugestão de produzir protótipos em escalas menores, o custo para produção de pequenos blocos em larga escala também extrapolou o limite de recursos financeiros disponíveis para a realização do trabalho. Sendo assim, concluiu-se que o método de fabricação das fôrmas deveria partir do material a ser utilizado, que deveria apresentar desempenho satisfatório como molde de blocos de concreto e possuir alta capacidade de reutilização.

Após a constatação da inviabilidade de produção devido ao tempo e custo requeridos pelas opções de fabricação digital, procurou-se uma serralheria para verificar a possibilidade de produção das fôrmas e qual seria o custo envolvido. O serralheiro validou a utilização de chapas metálicas de 2mm de espessura, que foram dobradas e cortadas em equipamento específico após envio do desenho detalhado com as medidas de cada segmento para a serralheria. Após essa etapa que ocorreu de maneira ágil e econômica, as chapas produzidas passaram então por um processo de solda, que também apresentou boa relação de custo-benefício, resultando na conformação de um molde rígido com fundo. Para o primeiro teste, foram produzidas uma fôrma de cada bloco. No entanto, o teste das fôrmas demonstrou que essas não funcionaram, já que o tipo de molde criado se mostrou ineficiente, pois o fundo soldado criou um vácuo de sucção, o que dificultou o desmolde das peças ocasionando sua má-formação. Uma das peças, inclusive, não conseguiu manter sua integridade física por falhas tanto no preenchimento da forma pela argamassa quanto no momento do desmolde, não se solidificando o suficiente após o processo de cura, o que resultou em sua ruptura ao ser tocada. A solução encontrada para

este problema foi criar fôrmas vazadas que pudessem ser desmontáveis e não precisassem ser removidas sendo puxadas para cima, o que poderia causar defeitos nas peças novamente (FIG. 94).

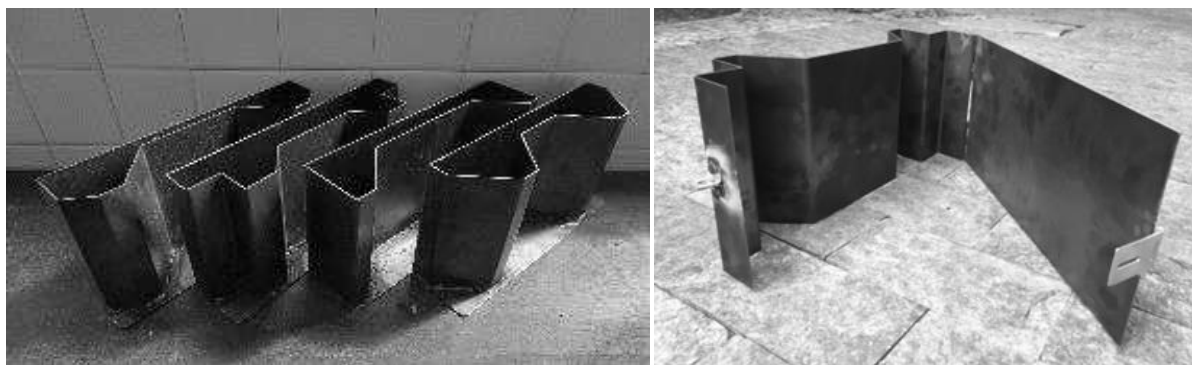


FIGURA 94 - Fôrmas iniciais (à esquerda) e fôrma com mecanismos de abertura (à direita)
Fonte: MARTINS, 2018

A necessidade de adequar o traço de concreto à operação e manuseio das fôrmas desencadeou outro estudo sobre qual tipo seria mais adequado para gerar elementos que pudessem ser desenformados rapidamente e com capacidade de serem submetidos a testes de compressão, o que demandou uma intensa pesquisa sobre quais ingredientes seriam necessários para compor o traço e suas respectivas quantidades. O aluno relatou que esse processo o fez perceber por meio de conversas com profissionais de longa experiência prática e fundamentação teórica sobre o assunto, que diferentemente do que ele imaginava, o concreto é um material que apresenta uma complexidade para produção, exigindo um rigor científico para a garantia de um desempenho adequado.

Para a realização dos ensaios de compressão simples, o aluno se engajou em realizar um estudo comparativo da resistência à compressão de blocos de concreto para definição do traço das amostras que seriam submetidas à avaliação, e, além disso, procurou aprender sobre os procedimentos do método de ensaio. Os resultados do experimento possibilitaram a realização de uma avaliação física

sobre o funcionamento real dos blocos quando submetidos a esforços de compressão simples e uma análise das suas linhas de fissura (FIG. 95), tendo os blocos sido aprovados neste processo. Embora as fôrmas e os blocos desenvolvidos tenham sido validados, o objetivo inicial que era a produção *high-low*, já que foi constatado que para a produção do bloco era necessário um ambiente controlado e uma mão de obra especializada.



FIGURA 95 - Bloco A, B e D respectivamente e suas linhas de fissura após ensaio de compressão
Fonte: MARTINS, 2018.

Dessa maneira, o aluno considerou que a recursividade do processo não foi encerrada, uma vez que esse processo só teria sido considerado encerrado se tivessem sido atingidos todos os objetivos propostos inicialmente. Para isso, seriam necessárias novas etapas iterativas entre (re)estabelecimento de parâmetros, (re)modelagem, análise de desempenho, fabricação de protótipos e ensaios laboratoriais, demandando mais investigação e exploração de outros métodos que não foram empregados nesse estudo. No entanto, pode-se afirmar que, embora o produto do trabalho não tenha cumprido os objetivos iniciais, o aluno realizou o desenho de um processo circular de pesquisa e desenvolvimento (FIG. 96), expandindo a conversa para além dos limites disciplinares.

REFLEXÃO-NA-AÇÃO:

- Objetivos* O objetivo inicial de realizar uma produção de módulos construtivos com uma abordagem *high-low* não foi cumprido, no entanto o processo desenvolvido propiciou a realização de um processo recursivo entre o processo de projeto, sua materialização e a relação deste com outros agentes do setor da construção.
- Processo* A circularidade entre prática material e processo digital propiciou que houvesse uma constante reflexão e recursividade da proposta. A partir da construção de um método para a criação de blocos de concreto, o aluno desenvolveu um processo projetual crítico acerca da utilização das ferramentas digitais disponíveis no campo da arquitetura e engenharia como instrumento de potencialização da competência propositiva, ampliando a rede de conexões entre os diversos agentes do setor da construção civil. Esse exercício promoveu uma reflexão sobre o emprego do processo paramétrico baseado em *performance*, reconhecendo sua influência sobre o que está sendo produzido. Durante esse ciclo, o aluno realizou uma incursão na área da engenharia dando início a um curto, porém relevante diálogo com diversos engenheiros devido ao fato de esse estudo ter adentrado uma área que demanda um conhecimento de alto nível de especificidade para a resolução do problema proposto. Além de ter expandido os conhecimentos almejados nas áreas de computação, análise estrutural e práticas construtivas, o aluno adquiriu experiência com a resolução de problemas e criação de alternativas reais, aproximando teoria e prática, e os processos digitais dos processos analógicos.²¹¹
- Linguagem* A conversa *homem-máquina-homem* foi fundamental para o desenvolvimento do processo, uma vez que, devido às especificidades

²¹¹ Atualmente o aluno, agora arquiteto, está trabalhando com cálculo e execução de estruturas de madeira laminada colada, desenvolvendo métodos para facilitar para os arquitetos a aplicação correta do material.

técnicas para análise e avaliação, foi necessário o auxílio de profissionais especializados na leitura dos métodos computacionais e na instrução dos procedimentos realizados por meio de métodos experimentais.

Meios

No trabalho desenvolvido foi possível compreender relações múltiplas entre processos de projeto e produção. O processo de projeção por meio de ferramentas digitais paramétricas e a preparação de material para fabricação produção e montagem anteciparam questões produtivas e construtivas. No entanto, compreendemos que o processo de análise do material produzido só completaria seu ciclo de recursividade por meio da construção e no uso, em que poderia ser avaliada a interferência do componente construtivo desenvolvido nas relações do canteiro e, posteriormente, o potencial ganho que este traria para o usuário final. Dessa maneira seria necessário contextualizar melhor a pesquisa, realizando testes de aplicação do componente com a participação de mão de obra, de tal maneira que esta pudesse auxiliar na construção de um produto ou de um processo que promoveria uma interferência positiva nas relações de produção.

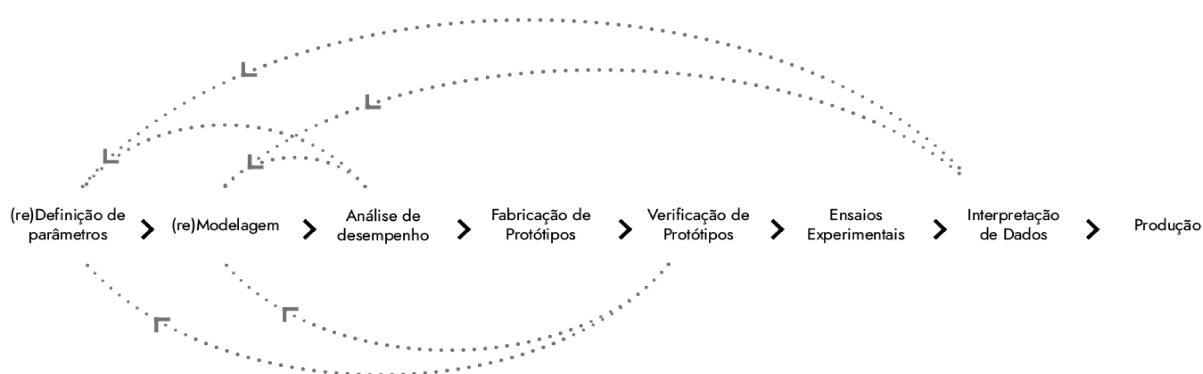


FIGURA 96 - Diagrama do processo elaborado
Fonte: MARTINS; BORGES, 2018.

3.6 Reflexão sobre os experimentos observados

Os experimentos realizados de forma individualizada constituíram-se como um sistema linear de *conhecer-na-ação*, e, também como um sistema autorregulado, propiciado pelo processo de *reflexão-na-ação*. No entanto, a reflexão sobre o conjunto de experimentos permitiu que estes se constituíssem como um sistema de aprendizagem, em que algumas hipóteses inicialmente formuladas foram confirmadas ou refutadas, permitindo que novas hipóteses surgissem no decorrer dos experimentos. Alguns experimentos foram realizados com o objetivo de testar hipóteses, enquanto outros tiveram como objetivo realizar uma autorregulação do sistema por meio do equilíbrio de sistemas com hipóteses concorrentes. Para tanto, utilizamos os três níveis de experimentação para uma prática reflexiva de Schön (1987), que consistem em *Experimentos Exploratórios*, *Teste de Movimento* e *Teste de Hipóteses*.

Os *Experimentos Exploratórios* incidem em uma condução de ação empírica, sem expectativas com relação aos resultados, pela qual sentimos o contexto e as ações, buscando reconhecer e aplicar as regras para verificar comportamentos, fraquezas e potencialidades. O *Teste de Movimento* consiste na condução de ações com a intenção de produzir alguma mudança. Nesse processo, as mudanças pretendidas podem ocorrer ou não, e eventualmente podem ocorrer de uma forma diferente da pretendida inicialmente. As mudanças propostas estão intrinsecamente relacionadas a um raciocínio reflexivo aplicado a partir das regras gerais para casos que requerem uma abordagem complexa. Já o *Teste de Hipóteses* pretende avaliar as ideias formuladas entre hipóteses concorrentes, podendo estar explícitas ou implícitas, em que o objetivo é desenvolver e testar novas formas de compreensão, estratégias de ação e novas formas de conceber os problemas. Sendo assim, os *Experimentos Exploratórios* tiveram como objetivo conhecer o funcionamento dos mecanismos tradicionais do ensino de estruturas em um processo de hibridização das disciplinas de projeto por meio dos métodos analíticos e experimental. Já os experimentos realizados como *Teste de Movimento* foram orientados para teste de hipóteses iniciais, tal como a introdução do método computacional de análise estrutural no contexto do ensino de projetos. E, por fim, os experimentos realizados como *Teste de Hipóteses* configuraram-se a partir das ações confirmadas ou

refutadas nos *Experimentos Exploratórios* e nos experimentos de *Teste de Movimento*, tendo estes funcionados como processos de autorregulação do sistema de aprendizagem.

Dessa forma, utilizando esses níveis de abordagem considerados por Schön (1987), iremos analisar como a experimentação com as disciplinas se constituiu de um processo não linear e recursivo, em que algumas hipóteses foram descartadas e novas hipóteses foram sendo formuladas, de tal maneira que novas ações foram conduzidas para a experimentação de novos fenômenos, que levaram à condução de novas reflexões e novas ações, em um processo constante de circularidade e recursão.

3.6.1 Experimentos Exploratórios

Nos experimentos que realizamos com esse propósito, a hibridização das disciplinas de projeto e estruturas foi realizada numa tentativa de conciliar os métodos de ensino de projetos com os métodos tradicionais de ensino de estruturas, analíticos e experimentais. O objetivo nesses processos foi testar o potencial de interação dos métodos de ensino de estruturas vigentes na projeção, buscando identificar aspectos positivos e falhas de uma maneira recursiva para os próximos experimentos.

O primeiro experimento realizado com essa intenção foi também o primeiro experimento realizado para esta tese, tendo ocorrido no segundo semestre de 2016 no curso de Arquitetura da PUC Minas, que consistiu em uma disciplina que já fazia parte da grade curricular do curso, denominada *Projeto em Estruturas de Concreto Armado* (Experimento 1). Como linguagem para o ensino de estruturas, foram utilizados modelos físicos para o desenvolvimento de uma sensibilização do comportamento estrutural e concepção do projeto, e o método analítico para validação do pré-dimensionamento das seções. Este processo foi válido para demonstrar as dificuldades que os processos tradicionais de aprendizagem apresentam enquanto linguagem para aplicação em processos de análise, síntese e avaliação. Devido à linguagem não propiciar uma interação com o modelo, a iteratividade com a forma estrutural projetada fica dificultada. O método analítico como único método de ensino leva a um processo linear, em que a solução é validada ou refutada,

não possibilitando o desenvolvimento da circularidade requerida para o processo de projeção arquitetônica.

O segundo experimento com essa proposta de exploração também foi realizado no curso da PUC Minas, na disciplina *Projeto em Estruturas Metálicas e de Madeira* (Experimento 5), realizada no segundo semestre de 2018, cujo enfoque foi a aprendizagem por meio de prototipagem manual e digital. Diferentemente dos outros experimentos, nesta proposta não foram utilizadas ferramentas de validação matemática (seja por método analítico ou método computacional), mas procurou-se desenvolver uma imaginação do comportamento estrutural por meio de uma prática material. Os exercícios realizados foram importantes para os alunos desenvolverem sensibilidade construtiva, de tal maneira que percebessem que o projeto não é um fim em si mesmo, e que, quando o material e a construção não informam o processo, corre-se o risco de haver distorções da proposta projetual e da espacialidade requerida quando essa se efetiva na construção. No entanto, quando foram solicitados a aplicar os conceitos apreendidos na concepção da estrutura em um projeto arquitetônico, a maioria dos alunos não conseguiu realizar essa transposição, o que demonstrou que o método experimental desenvolvido somente por meio de protótipos também não possibilita a aquisição de uma efetiva flexibilidade cognitiva para o desenvolvimento de uma projeção arquitetônica tectônica e recursiva.

3.6.2 Teste de Movimento

Os experimentos conduzidos desta maneira buscaram introduzir uma nova linguagem ao contexto de projeto, centrada na conversa entre homem e máquina. Para tanto foram explorados o potencial das ferramentas computacionais de análise estrutural e os conceitos de projeto baseado em *performance* por meio de processos de otimização, geração e *form-finding*. Nesses experimentos foram testados diferentes processos de interação dos estudantes com o *software* de análise estrutural no contexto da projeção, com maior ou menor intensidade, permitindo verificar a diversidade de aplicação da proposta.

O primeiro experimento desse tipo foi a disciplina *Arquitetura e Concepção Estrutural Digital* (Experimento 2), realizada no curso noturno de Arquitetura e Urbanismo da UFMG no primeiro semestre de 2017, cujo objetivo foi introduzir o uso de *softwares* de análise estrutural no contexto do ensino de projetos. A linguagem adotada propiciou que os alunos visualizassem o comportamento das estruturas de maneira interativa e iterativa. Essa possibilidade de circularidade e recursão, fez com que os alunos demandassem a participação de um engenheiro de estruturas para auxiliá-los a complexificar a análise estrutural apresentada pelo *software*. Esse processo promoveu o engajamento dos alunos com conteúdos relacionados ao método analítico, que, no ensino tradicional, por serem demasiadamente abstratos, não despertavam o interesse devido à dificuldade de aplicação ao desenvolvimento de projetos. No entanto, a disciplina demonstrou que a hibridização pretendida entre projetos e estruturas não ocorreu da forma esperada, uma vez que os alunos não tiveram uma grande preocupação com a inserção do projeto desenvolvido em seu contexto, tendo consistido apenas em um exercício de forma e resistência. Dessa maneira, esse processo gerou uma reflexão acerca do método de ensino de projetos, e como esse poderia corroborar que a disciplina tivesse de fato uma orientação para a articulação do espaço, e não somente para o desempenho da estrutura.

O segundo experimento, no segundo semestre de 2017, foi uma participação na disciplina de *OFIAUP* para o desenvolvimento do módulo de projeto de habitação (Experimento 3), também realizada no curso noturno de Arquitetura e Urbanismo da UFMG. A proposta foi desenvolver processo de projeto baseado no conceito de *Open Building*, de tal maneira que a concepção estrutural possibilitasse uma maior flexibilidade para a articulação do espaço, propiciando aos alunos que esta fosse realizada de tal maneira que não estivesse atrelada à tipologia estrutural de grelha. Para tanto, o processo de projeção arquitetônica foi orientado para o desenvolvimento de propostas baseadas na Teoria dos Suportes de Habraken (1972). O processo de *form-finding* computacional por meio de análise de tensões da volumetria pretendida foi secundário, consistindo em um instrumento para conceber estruturas otimizadas de maneira topológica. A hipótese inicial foi de que a instrumentação dos alunos com um procedimento relativamente simples de pré-dimensionamento poderia encorajá-los a explorar alternativas para a concepção da estrutura e sua integração com a espacialidade pretendida. Este processo foi realizado por alguns alunos, no entanto, essa

simplificação de procedimentos não demandou uma extrapolação da conversa, ou seja, os alunos não precisaram mobilizar conhecimentos teóricos relacionados a estruturas para a efetivação do exercício proposto. Dessa maneira, o experimento não propiciou de fato uma conversa com os materiais da situação, tendo ocorrido apenas uma comunicação técnica entre homem e máquina.

A terceira experiência, ocorrida no segundo semestre de 2018, consistiu em uma oficina para os alunos da PUC Minas, em que, de acordo com o nome, os alunos deveriam projetar e construir *Estruturas de Formas Ativas* utilizando *software* paramétrico de *form-finding*, e construir a estrutura com a possibilidade de utilização de máquinas de fabricação digital. Esse experimento foi orientado para a construção e suas restrições ambientais, temporais e materiais, buscando extrapolar a conversa *homem-máquina-homem* para além da simulação computacional. O processo consistiu em uma recursividade entre a prática material e a prática computacional, de tal maneira que os resultados de uma informavam o processo da outra. Dessa maneira, o processo promoveu uma reflexão sobre a expectativa projetual criada por meio da simulação computacional e o confronto com a realidade do processo de construção, que, no caso, demandou uma reconfiguração da proposta de projeto inicial, servindo como uma analogia do que ocorre na prática do canteiro.

3.6.3 Teste de Hipóteses

O experimento realizado desta forma foi a disciplina *Flexibilidade Estrutural e Articulação Espacial* (Experimento 6), ministrada no curso diurno de Arquitetura e Urbanismo da UFMG, realizado no segundo semestre de 2018. Esta proposta consistiu em um amadurecimento dos processos anteriores, em que foi possível aplicar na estruturação do experimento as hipóteses que obtiveram sucesso e evitar as que não foram bem-sucedidas anteriormente. Nessa experiência, houve a preocupação de desenvolver os três conceitos fundamentais para a realização da conversa no ambiente de projeto na cultura digital: a condução do processo por meio de modelagem paramétrica, simulação da *performance* e a orientação para os aspectos tectônicos.

O experimento confirmou o potencial da abordagem paramétrica para o ensino de projeto para além do uso da ferramenta digital. Ao estabelecerem parâmetros socioculturais e parâmetros estruturais e construtivos para a projeção, os alunos conseguiram trabalhar de fato com o contexto, desenvolvendo propostas orientadas para a articulação do espaço. O desenvolvimento de prototipagem física propiciou uma sensibilização para o comportamento da estrutura proposta e serviu como uma orientação para a modelagem paramétrica. A simulação da *performance* material por meio de *software* de análise estrutural inserido no ambiente de modelagem paramétrica facilitou a interação e a iteração, propiciando uma negociação de parâmetros de forma a promover a flexibilidade estrutural em prol da articulação do espaço. A informação dos parâmetros construtivos foi fundamental para que os alunos desenvolvessem proposições com orientação tectônica, com menor ou maior intensidade.

No entanto, a recursividade da proposta se limitou à prática digital, não tendo havido uma nova recursividade com a prática material, que poderia ocorrer por meio da interação com laboratório de materiais ou com o desenvolvimento de testes em canteiro experimental. Esta circularidade entre prática digital e prática material não era uma hipótese inicial do início do processo, que se centrava na investigação sobre o potencial de conversa entre homem e máquina, tendo sido percebida por meio de reflexão surgida nos processos de *conhecer-na-ação*.

Essa nova hipótese de circularidade entre a prática digital e a prática material gerou o último experimento relatado, que se constitui em um Trabalho de Conclusão de Curso (Experimento 7), em que foi possível testar vários procedimentos interdisciplinares para a realização do desenho de um processo de investigação, vislumbrando a expansão da conversa para além da universidade, que em um horizonte de projeção poderia incluir a participação da mão de obra para a construção de um processo tecnológico democrático. Considera-se que este experimento se constituiu de uma nova possibilidade de um processo de *experimentação-na-ação*, em que a prática material e a prática de canteiro seriam fundamentais para a construção de processos de projeção. Dessa maneira, constatamos que os experimentos da tese apontaram para um método de projeto que admite a participação de outros agentes da

construção civil e futuros usuários, por meio de práticas de projeção em que o arquiteto concebe o projeto do processo mais que do que o produto final.

3.7 Reflexão para novos experimentos

A *reflexão sobre a reflexão* gerada pela observação do sistema de experimentos conduzidos até então nos levou a um processo de autorregulação do sistema de aprendizagem desenvolvido, tendo como dados de saída do sistema considerações acerca dos objetivos, do processo, da linguagem e dos meios para a proposição de novos experimentos que hibridizem o ensino de projetos com o ensino de estruturas no ensino de arquitetura (FIG. 97). Desta forma, temos a seguinte reflexão e saída do sistema de aprendizagem:

Objetivos Consideramos que o objetivo dos próximos experimentos deve ser o de desenvolver processos de projeto dirigidos para a articulação do espaço, potencializados pelas possibilidades de flexibilidade estrutural, não somente para a construção de produtos, mas também de processos de projeção. Para tanto, devem ser trabalhados processos orientados para uma prática arquitetônica paramétrica informada pelos aspectos tectônicos com abertura para a inclusão de outros agentes técnicos, trabalhadores e usuários, promovendo testes físicos dos materiais e práticas de experimentação em canteiro;

Processo Conforme o sistema de aprendizagem desenvolvido foi possível constatar que nenhum método de ensino de estruturas isoladamente promove uma efetiva aprendizagem reflexiva. Desta forma, o desenho do processo de ensino e aprendizagem deve considerar o desenvolvimento de procedimentos circulares e recursivos entre a prática digital e a prática material, podendo haver um arranjo entre os métodos analíticos, experimentais e computacionais, em que a escolha do método utilizado dependerá dos objetivos propostos;

Linguagem

As hibridizações ocorreram não somente entre as disciplinas de arquitetura e engenharia, mas também com relação à combinação de métodos de ensino de estruturas. Os experimentos possibilitaram uma associação de métodos tendo em vista que os métodos experimentais possibilitam trabalhar o contexto; o método computacional facilita a visualização, a interação e a iteração com os modelos, além de se constituírem enquanto uma linguagem comum; e, o método analítico permite um trabalho em escala, podendo ser desenvolvido até no nível do detalhamento de perfis e ligações estruturais. Assim, os alunos conseguem de forma reflexiva pensar durante a prática de projeção sobre o mecanismo do material; a matemática da construtibilidade ainda na concepção, abandonando a ideia de se criar estratégias de racionalização posteriormente ao projeto arquitetônico; e, na investigação de como a tecnologia pode auxiliar no processo de projeto e construção. A conversa *homem-máquina-homem* conciliando os três métodos de ensino de estruturas (método computacional, método experimental e método analítico) articulados de acordo com a proposta apresenta o potencial de criar uma nova linguagem para a prática de projeção, mais inclusiva e dialética, podendo facilitar a exploração de soluções e incluir outros agentes na prática de projeção;

Meios

A conversa visando o acordo com os meios deve ser orientada para o desenvolvimento de processos não conservativos entre agentes no ensino de projetos, provocando entre os participantes um acordo com os objetivos por meio de uma relação cooperativa, inovadora e responsável, levando a um tensionamento da prática vigente, deslocando-a de um enfoque programático e tipológico para uma prática processual, material, tectônica, socioespacial e política. Para tanto, o curso de arquitetura deve buscar desenvolver um percurso para uma prática de projeção tectônica, adaptado às necessidades específicas dos arquitetos, e não se constituir como um percurso

disciplinar, em que o ensino de estruturas consiste em uma trajetória adaptada originado de fragmentos do percurso de formação dos engenheiros de estruturas. Para isso, devem ser trabalhados conceitos-chaves que propiciem a concepção estrutural (geometria, material, ações incidentes e seções transversais) relacionada à prática de projeção, devendo estar baseada na experimentação material.

O ensino prático-reflexivo centrado numa relação de conversa entre arquitetos e engenheiros, pode ampliar a complexidade da abordagem com relação à oferecida pela prática de ateliê. No entanto, para que isto ocorra, é necessário repensar também os métodos de ensino de projeto, buscando desenvolver processos abertos à prática da conversação, estimulando relações de cooperação interdisciplinares, orientadas para uma prática dialética. Para possibilitar uma prática dialética material, é necessário que haja uma disponibilidade para uma inversão dos procedimentos de ensino, de tal modo que os laboratórios de materiais e o canteiro experimental sirvam não só para a demonstração de conceitos abordados em aulas expositivas, mas que as aulas expositivas sirvam para informar a experimentação desenvolvida nos laboratórios e no canteiro. Isso possibilita que os processos de projeto desenvolvidos por estudantes de arquitetura e arquitetos tenham uma circularidade e uma recursividade entre prática material e prática digital, criando uma conexão entre a simulação computacional e as relações com o mundo real, abarcando não somente as considerações materiais, mas também a construção social e política realizada por meio do projeto.

A consideração do projeto como uma construção socioespacial é fundamental para que sejam repensadas as relações entre arquitetos e engenheiros, de tal maneira que sejam refutadas práticas conservativas nocivas que corroborem uma prática de monólogo atectônica, possibilitando dessa maneira que sejam construídos processos que

propiciem uma prática de conversação tectônica. Essa prática tem potencial para tensionar as relações entre os agentes da construção civil, promovendo uma reflexão sobre os papéis disciplinares, propiciando assim a expansão da conversa interdisciplinar para a prática profissional, levando potencialmente à emergência da construção de novas abordagens processuais, não somente técnicas, mas também sócias econômicas. Essa reflexão que emergiu do sistema de aprendizagem desenvolvido será mais bem abordada no próximo capítulo.

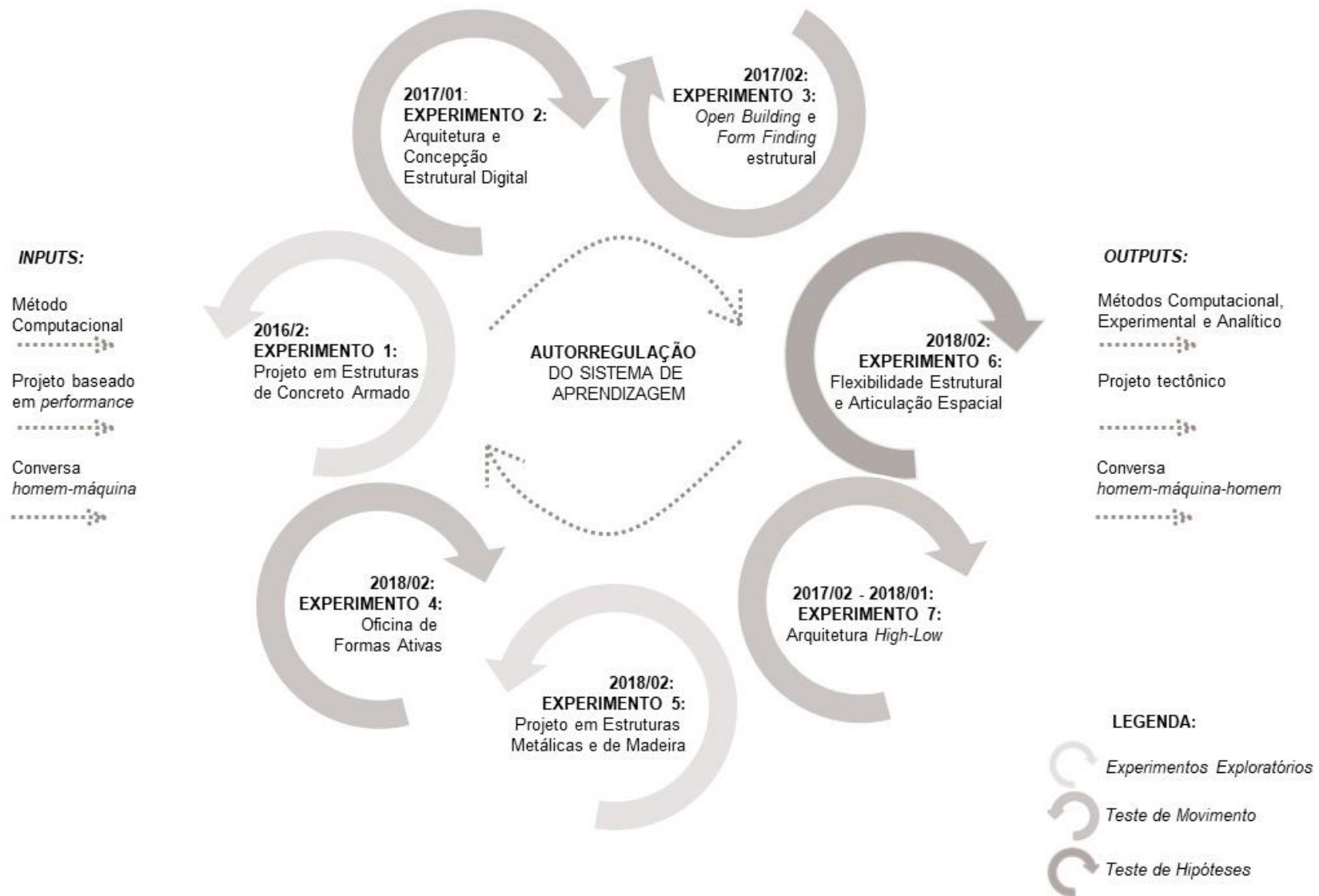


FIGURA 97 - Sistema de aprendizagem autorregulado
 Fonte elaboração da autora

4 CONVERSA EXPANDIDA

O modo como está organizado o setor da construção civil, cuja ênfase está nas relações de monólogo entre arquitetos e engenheiros, desencoraja os arquitetos a se aprofundarem nas questões relativas à engenharia. Os engenheiros eminentes ou subordinados (ambos sob domínio dos interesses do capital) dominam as relações de produção, enquanto os arquitetos eminentes e subordinados se situam em posição marginal a essas decisões. No entanto, os arquitetos eminentes, possuidores de alto valor de capital simbólico, desenvolvem relações de monólogo assimétricas com os engenheiros, de tal maneira que as decisões do projeto arquitetônico devem ser conservadas e respeitadas. Dessa maneira, os engenheiros eminentes ou subordinados, ao realizarem escolhas tecnológicas para o canteiro, o fazem de tal maneira que essa corrobore com os parâmetros estéticos e de espacialidade, estando menos preocupados com a questão da eficiência. Os arquitetos eminentes que atuam nessa conformação não necessitam interferir no processo tecnológico de produção da arquitetura, uma vez que este processo trabalha para que seja mantido seu *status quo* dentro e fora do campo.

No entanto, as relações de monólogo são praticadas somente pela elite do campo da arquitetura, que atua de maneira autônoma,²¹² em uma posição muito diferente da sua massa de praticantes, cuja atuação é profundamente impactada pelas relações socioeconômicas do setor da construção civil. Dessa maneira, a produção dos arquitetos subordinados, cuja produção é ainda mais submissa aos fatores externos, é principalmente a

²¹² Enfatiza-se que a autonomia dos arquitetos eminentes está limitada à produção de bens simbólicos inusitados e inovadores, entretanto, sua atuação é heterônoma com relação ao setor da construção civil.

que necessita se reconectar com os demais agentes do setor, de tal maneira que seja possível deixar a condição de subordinação, para alcançar uma condição de participação ativa. Porém, para que isto ocorra, é necessário que sejam revisados os princípios formadores do sistema tecnológico no qual o campo da arquitetura se fundamenta.

A Teoria Crítica da Tecnologia,²¹³ desenvolvida pelo filósofo Andrew Feenberg (1943-), propõe que as tecnologias sejam recontextualizadas de tal forma a unir elos perdidos por meio da abertura da caixa-preta dos códigos técnicos,²¹⁴ problematizando as formações que o fundamentam, incluindo nessas formações, além dos aspectos técnicos, os valores éticos, culturais e estéticos. Dessa forma, enquanto os códigos técnicos não sofrerem contestações, o processo seguirá inalterado até que este sofra contestações ou usos subversivos. Para isso, considera ser necessário atuar democraticamente nos sistemas técnicos de tal maneira que possam ser retificadas, superadas, proibidas ou transformadas as tecnologias nocivas, embora lucrativas.

Feenberg (2013) busca revelar o modo como a racionalidade se faz presente nos sistemas técnicos, vislumbrando modos de liberar a razão instrumental²¹⁵ para outros fins, de tal maneira que esses atendam às aspirações e aos interesses construídos em torno de novos

²¹³ A abordagem de Feenberg está baseada no construtivismo sociológico, contestando as crenças do *Instrumentalismo* e do *Determinismo*, em que ambos estão baseados na crença da tecnologia como um encadeamento, que se refere ao que a teoria econômica da inovação chama de processo *lock-in*, que consiste em um trancamento de partes da informação do sistema tecnológico. O *Instrumentalismo* consiste em uma visão padrão moderna que considera a tecnologia apenas um instrumento para satisfazer as necessidades humanas. O *Determinismo* é uma visão mantida pelas ciências sociais, segundo a qual a força motriz da história é o avanço tecnológico, tendo a tecnologia o papel de moldar as sociedades de acordo com as exigências da eficiência e do progresso. O *Substantivismo*, assim como a Teoria Crítica, acredita que a escolha da tecnologia não é apenas instrumental, mas está carregada de valores relacionados à eficiência e poder, considerando dessa maneira, que a tecnologia não é neutra, ao contrário do que supõe o *Instrumentalismo* e o *Determinismo*. No entanto, o que difere a Teoria Crítica de Feenberg (2013) do *Substantivismo* é a visão otimista quanto ao desenvolvimento das formas de controle, prevendo possibilidades de abertura e graus de liberdade por meio de processos mais democráticos de *design* e desenvolvimento. Para tanto, os novos modelos tecnológicos desenvolvidos devem renovar seus valores estéticos, de autonomia e de organização social.

²¹⁴ O código técnico é a corporificação de padrões técnicos e legais em um código estável, de tal maneira que são articuladas as relações entre as exigências sociais e técnicas, servindo para a realização de um interesse ou de uma ideologia. Os códigos técnicos normatizam o trabalho técnico e se materializam em regras que asseguram que as funcionalidades essenciais, assim como os valores subjacentes, sejam mantidas e preservadas de alterações que as subvertam (FEENBERG, 2013).

²¹⁵ O conceito de racionalidade instrumental (FEENBERG, 2013) está baseado nos princípios de eficiência e poder, e conseqüentemente, de dominação e controle, sendo o mundo do trabalho o domínio principal para a manutenção e reprodução da estrutura. Nesta concepção a função estética do objeto pode estar separada do ato técnico, sendo atribuída a uma divisão incorporada do processo. Para Feenberg (2013) a separação institucional parcial dos níveis de instrumentalização favorece a ideia de que são completamente distintos, o que obscurece a natureza social de cada ato técnico.

modelos sociais e existenciais por meio da renovação dos valores estéticos, dos valores de autonomia e da organização social. Para isso, Feenberg (2013) distingue a instrumentalização de duas maneiras, diferenciando a primária da secundária. A instrumentalização primária é caracterizada pelas relações técnicas básicas orientadas para os valores de mercado, sendo dessa forma, reducionista e hierárquica. A teoria da Instrumentalização primária pressupõe uma simplificação dos objetos, tendo estes uma relação funcional com a sociedade. Já a instrumentalização secundária ou societária por ele proposta sugere a recuperação de desvios negativos esquecidos pelos sistemas técnicos por meio de propostas de adequação sociotécnicas feitas a partir de uma crítica projetiva recontextualizante.

A trajetória tecnológica na sociedade consiste em assimilar e ocultar dispositivos no e do código técnico. O conceito de crítica projetiva de Feenberg (2013) busca preencher a lacuna dos valores rechaçados pelos sistemas técnicos, trabalhando aspectos fundamentais que podem alterar seus dispositivos internos, oferecendo uma proposta de reflexão sobre a democratização de processos internos e ocultos que regem os códigos técnicos. Essa crítica projetiva deve ser capaz de explicitar os mecanismos e os valores implícitos nas alternativas técnicas, de tal maneira que seja possível delinear aspectos fundamentais que alterem internamente os sistemas técnicos. A recontextualização das tecnologias pode unir “elos perdidos” ou aspectos e dimensões valorativas depreciados no código técnico vigente, com o intuito de promover uma democratização dos processos.

De acordo com Feenberg (2013), democratizar a tecnologia significa subverter as práticas técnicas, modificando seus procedimentos e seus arranjos por meio de uma racionalização subversiva, em que a tecnologia deve ser compreendida de uma forma mais abrangente e não como um meio para obter lucro e poder. A racionalização subversiva deve estar baseada na responsabilidade da ação técnica e na sua atuação em contextos humanos e naturais, tendo consciência de que a escolha da técnica é política e moralmente significativa. Dessa forma, Feenberg (2013) considera que o fundamental para a democratização da tecnologia é encontrar maneiras novas de privilegiar valores excluídos e de realizá-los em arranjos técnicos novos, restaurando a atuação dos atores subordinados por meio de alianças técnicas. Para tanto, sugere a construção de uma forma alternativa de racionalidade técnica propondo uma

reforma da tecnologia moderna,²¹⁶ de tal maneira que a comunicação humana, os limites ambientais e a habilidade dos trabalhadores sejam incorporados em sua própria estrutura.

A reforma tecnológica deve promover a elaboração de condições cognitivas para que os indivíduos ultrapassem os enquadramentos disciplinares, engajando-se nas experimentações estéticas, nos debates éticos e políticos, e, nas controvérsias técnicas. No entanto, de acordo com Feenberg (2013), a construção social do código sociotécnico que é fornecido no ensino não permite que os estudantes atuem na contracorrente de sua condição subordinada e periférica, devendo haver dessa forma uma profunda revisão nas atividades de ensino, pesquisa e extensão, buscando novas praxes, métodos e processos de trabalho.

A proposta da conversa interdisciplinar no ensino da prática projetual posta nesta tese, visou promover um novo modelo de arranjo técnico que se propõe a redefinir os limites disciplinares na prática, na teoria e no ensino, estimulando novos pontos de vista e construindo novos significados. Esse novo arranjo sugere potencialmente a reconstrução de um modelo de relação entre arquitetos e engenheiros por meio de mecanismos de produção não conservativos, funcionando assim como uma crítica projetiva recontextualizante. No entanto, para que esta reconstrução tenha o potencial de expansão para a conformação de um modo de instrumentalização secundária na prática profissional, é necessário que seja analisada a condição do contexto vigente. Dessa maneira, a partir dessa contextualização do modelo, faremos uma análise dos riscos e das potencialidades para uma reconstrução do modelo técnico de projeção tendo uma orientação não conservativa, de tal modo que essa reconstrução incorpore valores democráticos em seu sistema de atuação.

4.1 Reconstrução do modelo técnico de projeção

Conforme já vimos anteriormente, as relações de monólogo entre arquitetos e engenheiros representam uma construção social centrada na eficiência e no poder, em que as decisões tecnológicas são orientadas para e pelos valores de mercado. Nesse modelo, as decisões

²¹⁶ Os sistemas tecnológicos modernos tendem a substituir a comunicação humana por sistemas técnicos ou burocráticos em nome da eficiência. No entanto, a subversão deste modelo implica promover ambientes abertos à comunicação, de tal maneira que seja possível a realização dos potenciais dos indivíduos (FEENBERG, 2013).

estão centradas numa perspectiva instrumental primária, em que técnica e a estética podem ser fragmentadas, cujo resultado é a perda da percepção social do significado dos atos técnicos. Esse modelo tecnocrático perpetua as estruturas de poder das elites econômicas de forma tecnicamente racional, tendo como maior implicação a ausência de reflexão sobre os limites éticos dos códigos técnicos, elaborados sob a regra da autonomia operacional²¹⁷.

Para o Frampton (1995), a possibilidade de uma trajetória tectônica em face de uma civilização pós-industrial só será possível por meio da transformação do caráter tecnoeconômico da construção civil, de tal maneira que os arquitetos se conectem à indústria e ao canteiro. Dessa forma, a proposta de reconstrução das práticas de projeção por meio da conversa entre arquitetos e engenheiros proposta nesta tese é desenvolver um modelo de racionalidade ancorado nos princípios da instrumentalização secundária, em substituição ao modelo tecnológico moderno baseado em instrumentalização primária. Essa forma alternativa de racionalidade técnica por meio da reforma da tecnologia moderna deve ser realizada de acordo com o proposto por Feenberg (2013), que consiste em promover a incorporação da comunicação humana (relações de conversa) e da percepção dos limites ambientais (orientação tectônica).

Dessa maneira, para que haja uma reorientação do processo de projeção para uma abordagem tectônica por meio de instrumentalização secundária, é necessário que haja a revisão dos códigos técnicos, tanto do código técnico arquitetônico quanto do código técnico da engenharia civil. Para tanto, propomos a criação de um “código tectônico” que consistiria não na fusão dos códigos técnicos de ambas as disciplinas, mas do processo de destrancamento²¹⁸ de alguns pontos fundamentais, de tal forma que possibilite o estabelecimento de relações de conversa constituídas de contexto, linguagem comum, acordo, engajamento e ação e transação.

A conversa *homem-máquina* proposta como hipótese inicial para os experimentos anteriormente descritos possibilita o destrancamento parcial do código da engenharia, uma

²¹⁷ De acordo com Feenberg (2013), a autonomia operacional se refere à liberdade do proprietário dos meios de produção para tomar decisões independentes, sem levar em conta os interesses de seus subordinados e do contexto.

²¹⁸ Em referência ao termo *lock-in* utilizado pela Economia, em que com o trancamento dos códigos técnicos, os usuários se veem presos a determinados produtos ou serviços por interoperabilidade com outros usuários.

vez que para esse destrancamento é necessário que haja não somente o contato com a teoria e a ferramenta, mas também a aquisição da experiência profissional. Dessa forma, o modelo *homem-máquina-homem* foi o que melhor propiciou o destrancamento de informações do código técnico da engenharia para uma fusão parcial com o código técnico arquitetônico, uma vez que possibilitou de fato uma relação dialética de conversa entre o arquiteto e o engenheiro. Assim, a conversa *homem-máquina*, propiciada pela aprendizagem de análise estrutural computacional (que para a engenharia de estruturas atende a um princípio de instrumentalização primária), quando levada para ser incorporada ao código arquitetônico, tem o potencial de desenvolver um tipo de instrumentalização secundária, que pode também incluir um processo de humanização na educação dos engenheiros. Para Schön (1987), o ensino de engenharia deveria estar focado no projeto, em que os estudantes desenvolveriam assim como nos cursos de arquitetura, exercícios projetuais, sendo encorajados a refletir sobre os conflitos profissionais, organizacionais e valores sociais em que os problemas se enquadram.

No entanto, é necessário que o ensino de projetos também seja aberto à substituição de um modelo de projeção com um acerto da forma linear, para um modelo em que o arquiteto não tenha o controle do objeto projetado, mas sim do processo, permitindo que a arquitetura surja da participação e da emergência entre uma série de agentes. Dessa maneira, o processo de instrumentalização secundária por meio da criação de um código tectônico deve ter como horizonte a democratização da tecnologia, buscando, de acordo com o arquiteto Sérgio Ferro²¹⁹ (2006), um desenho da produção²²⁰ em substituição a um desenho para a produção, reinsserindo a arquitetura no campo da construção e da economia política.

A separação entre projeto e execução é própria do campo da construção, que atende a um modelo moderno tecnocrático. No período gótico, projetar não era uma atividade exterior ao canteiro, mas era concomitante ao processo de construção. A mudança na relação entre

²¹⁹ Sérgio Ferro é arquiteto, pintor e desenhista. Foi professor em várias escolas de arte e arquitetura, dentre elas, a FAUUSP e na Universidade de Grenoble. Na década de 1960, formou juntamente com Rodrigo Lefèvre e Flávio Império constituiu o grupo Arquitetura Nova, que propunha o deslocamento da discussão arquitetônica para aspectos como o papel social do arquiteto, a industrialização e as relações de produção no canteiro.

²²⁰ Para Ferro (2006), o desenho da produção deve ter como princípio central considerar o trabalho enquanto unidade da produção, propiciando a divisão e a autonomia das equipes de trabalho e priorizando a segurança e a preservação do conhecimento dos trabalhadores.

desenho e canteiro começou a se delinear no séc. XII, mas foi com Brunelleschi no séc. XV, na ocasião da construção da cúpula da Catedral de Florença - tendo-se tornado um marco importante na História da Arquitetura com a introdução da ideia de projeto na produção do espaço -, que a forma de produção dividida e heterônoma se consolidou na direção dos moldes da produção em manufatura que estava sendo instaurada à época em outros setores. De acordo com Ferro (2010), essas relações produtivas foram ainda mais reforçadas pela ascensão do engenheiro na virada do séc. XVIII para o XIX, quando esse profissional acaba interposto entre o arquiteto e o canteiro por meio do domínio da ciência e da tecnologia. Esse domínio técnico e científico dos engenheiros possibilitou que se colocassem em posição de domínio das relações de produção na construção civil, servindo como mediadores do diálogo dos arquitetos com os demais agentes do setor, situação que predomina até os dias atuais, inclusive no ensino.

O ensino de estruturas nos cursos de arquitetura se propõe a preparar os alunos para “dialogarem com os engenheiros”, uma vez que esse diálogo não ocorre com os demais agentes, devendo esse profissional ser o intermediário entre o projeto e a construção. Nas relações de monólogo, em que o arquiteto possui alto valor de capital simbólico, o diálogo com o engenheiro é sempre colaborativo, uma vez que a eficiência não é o valor preponderante para determinar as relações de produção, mas sim o atendimento aos anseios estéticos e espaciais do projeto arquitetônico. Nessa relação, o arquiteto não necessita desenvolver uma relação de conversa com os demais agentes; todo o sistema da construção irá trabalhar para a efetivação do seu desenho. No entanto, nas relações desenvolvidas com arquitetos altamente subordinados aos valores mercadológicos de eficiência e lucro, a obstrução do acesso aos agentes da construção também obstrui as possibilidades do desenvolvimento de instrumentalização secundária no setor da construção civil. Assim, para que o ensino de projeção arquitetônica desenvolva uma orientação tectônica e democrática com interferência no sistema produtivo, é necessário que esse substitua o objetivo de preparar os estudantes para “o diálogo com o engenheiro” por um ensino voltado para a “conversa com os agentes”.

Para Ferro (2006), a falsa oposição entre a arquitetura e a técnica faz da produção um mistério para o arquiteto, gerando um desenho de projeto geralmente orientado pela opção

plástica, o que considera as forças produtivas ao invés de um instrumento de mediação, como um obstáculo para a produção do espaço. No entanto, na produção da arquitetura organizada como manufatura,²²¹ a figura do arquiteto praticamente desaparece do ambiente do canteiro devido à separação de projeto e construção, não tendo quase nenhuma influência sobre os métodos empregados. Dessa maneira, para que seja realizada a reconstrução do modelo de tal forma que o arquiteto deixe de ter um papel subordinado para assumir uma condição atuante, é necessário que sejam recuperadas as conexões com os demais agentes a partir de uma reorganização comunicativa dos agentes, por meio da revisão e do destrancamento de informações de seus códigos técnicos.

Para Feenberg (2013), as relações de cooperação têm o potencial de reduzir a alienação pela substituição do controle vertical pela auto-organização, por meio de uma prática reflexiva “metatécnica”, em que a própria relação com a técnica como matéria prima favoreça formas mais complexas de ação técnica. As ferramentas digitais de projeção apresentam um potencial para facilitar a reorganização estrutural do setor da construção civil, de tal maneira que permitem uma auto-organização entre os agentes, podendo potencialmente propiciar o desenvolvimento de relações de conversa necessárias para uma instrumentalização secundária. Para tanto, é necessário que o uso das ferramentas digitais transcenda as experimentações formais utilizadas por práticas conservativas, para trabalharem no sentido de uma reordenação produtiva processual buscando procedimentos não conservativos e orientados para uma projeção tectônica.

Na produção da arquitetura contemporânea orientada pelas relações conservativas de monólogo, as ferramentas digitais de projeto permitiram uma autonomia formal com alguma

²²¹ Modo de produção predominante na construção civil no Brasil. Esse arranjo se caracteriza pela divisão dos processos entre manufatura serial e manufatura heterogênea. A manufatura serial corresponde a uma sucessão cumulativa de equipes de produção que executam as tarefas no canteiro, e geralmente está presente em canteiros menores. Já o objetivo da manufatura heterogênea é obter processos quase industriais de produção, tendo uma montagem de peças industrializadas no canteiro e que não obedecem a uma sucessão cumulativa de trabalho. A manufatura heterogênea procura uma padronização do processo construtivo, com ciclos mais rápidos de construção. Embora não seja considerada uma produção industrial, procura-se uma escala industrial de produção com elevado grau de especialização dos processos. Neste contexto, são encontrados um elevado grau de padronização dos procedimentos e um rígido sistema de controle do trabalho no canteiro de obras. Mas, embora sejam utilizados insumos produzidos com alta tecnologia, o processo produtivo é descontínuo. Além disso, existe um preconceito com relação à mão de obra, que é considerada desqualificada, reforçando o caráter de exploração do trabalho como uma das formas de se obter mais-valia. Esses fatores dificultam o desenvolvimento tecnológico do setor, travancando qualquer inovação de processos no canteiro.

inovação estética, enquanto as ferramentas de fabricação digital e robótica tornaram o processo produtivo factível. Embora muitas das obras de capital simbólico tenham utilizado processos de fabricação digital no canteiro, isso não significou uma transformação na produção no sentido da promoção de práticas tectônicas. Na maioria das obras, o canteiro teve uma produção híbrida, com o trabalho artesanal de montagem atuando em conjunto com a fabricação digital de componentes. Em locais onde era possível obter a mão de obra mais barata, os processos se tornavam mais artesanais, mesmo com projetos de alta tecnologia (ARANTES, 2012). Sendo assim a inovação tecnológica de projetos não foi acompanhada por uma inovação tecnológica no espaço da produção, mesmo em países centrais, tendo o canteiro mantido a mesma lógica da manufatura e da extração da mais-valia da mão de obra. Desta maneira, o avanço tecnológico propiciado pelas ferramentas digitais para a produção de formas complexas não foi suficiente para que os arquitetos mobilizassem as qualidades físicas, construtivas e plásticas dos materiais, tendo também desconsiderado o trabalho e os trabalhadores do canteiro.

Dessa forma, o principal risco de transferência de tecnologia de projeto e produção desconsiderando o contexto é reforçar o monólogo amparado pela racionalidade instrumental, o que resultaria no uso das ferramentas digitais apenas como instrumentalização primária, sem qualquer alteração do código socio técnico vigente, estabelecido pela relação entre forças sociais e políticas que o conformam. Para Montaner²²² (2016), importar tecnologias sustentáveis de países industrialmente avançados não é a solução, devendo se experimentar uma arquitetura adaptada às possibilidades da tecnologia, dos materiais e da economia locais, bem como da paisagem, da cultura e do clima do lugar.

As sociedades das quais a tecnologia é originária desenvolvem ao mesmo tempo a capacidade de controlar e enquadrá-las dentro dos seus objetivos, tendo previamente desenvolvido também a capacidade de as suportar (infraestrutura, recursos humanos, sistema científico, tecnologias subsidiárias etc.). No entanto, as sociedades localizadas na periferia do capitalismo não elaboram nem a tecnologia, nem a capacidade de controlá-la. Além disso,

²²²Josep Maria Montaner é doutor em Arquitetura. Atualmente é catedrático do Departamento de Composição da Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona (ETSAB-UPC).

também carecem de infraestrutura para sustentá-la. De acordo com Pelli²²³ (1990), as tecnologias são transferíveis dos países centrais para os países periféricos com base na suposição de que essa tecnologia ou estrutura de inter-relações (autores, operações, instrumentos e materiais) não se limite aos feitos mecânicos de transformação e aos materiais e ferramentas por si só, mas também que abarquem as formas de inserção desses feitos de transformação dentro de um sistema social, econômico e cultural.

Para Pelli (1990), as tecnologias “de ponta”, ou tecnologias pós-industriais, não necessitam gerar um aparato com novas estruturas tecnológicas para se inserir no meio. Elas assemelham-se mais ao mercado informal do que às regras mais complexas da estrutura formal de produção, uma vez que as tecnologias de ponta têm o poder de atravessar os esquemas formais parciais e buscar diretamente o mercado informal. Dessa forma, a absorção dessas tecnologias deve ocorrer de forma que se adaptem às circunstâncias da sociedade e à sua capacidade de dar sustentação a uma estrutura produtiva que a beneficie enquanto conjunto, respondendo às suas prioridades de absorção e participação. Para tanto, deve ocorrer um processo de conferência, conversão e síntese dos recursos disponíveis em diferentes setores, além do desenvolvimento de uma relação de informação, absorção crítica e controlada da tecnologia.

No entanto, para Feenberg (2013), o regime de regulação do mercado consiste em uma arena de disputa da melhor tecnologia para sua base capitalista e elimina todas as tecnologias não capitalistas geradas. Para Renato Dagnino²²⁴ (2014), a própria ideia de que uma tecnologia tem “ponta” busca, na realidade, substituir a noção de que algumas tecnologias são adequadas para determinados fins, e não para outros, dificultando a percepção de que algumas são funcionais para a reprodução do capital, mesmo que em detrimento de valores morais, ambientais etc.

²²³ Victor Saúl Pelli é arquiteto argentino e dedicou sua carreira ao desenvolvimento de habitação social, pesquisa, ensino, ação participativa e assistência técnica a diferentes comunidades, colocando o usuário em um papel fundamental dentro do processo projetual.

²²⁴ Renato Dagnino é engenheiro, estudou Ciências Humanas e Economia no Chile e no Brasil. Atualmente é professor titular na Universidade Estadual de Campinas nas áreas de Estudos Sociais da Ciência e Tecnologia e de Política Científica e Tecnológica. Sua principal abordagem de trabalho é o desenvolvimento de estudos sobre Tecnologia Social, tendo realizado diversas publicações relacionadas ao tema.

Pelli (1990) defende o conceito de uma tecnologia latino-americana apropriada em que o desenvolvimento tecnológico esteja atrelado a uma importação de modelos formais desenvolvidos nos países capitalistas hegemônicos, em que a sua implementação nos países periféricos esteja associada à sua adaptação às circunstâncias da sociedade e às suas respectivas metas de evolução, respondendo a suas prioridades de distribuição e participação. As Tecnologias Apropriadas²²⁵ constituíram um importante marco na visualização de inovações alternativas às matrizes tecnológicas vigentes ao longo do séc. XX. As ferramentas, instrumentos e artefatos, originados a partir desta concepção, possuíam forte correlação com as noções de adequação, uso sustentável dos recursos naturais e sua apropriação sociocultural e econômica pelas comunidades.

A importação de modelos formais defendida pelo conceito de Tecnologia Apropriada pode ser um recurso mais barato para os países periféricos em comparação ao custo de se desenvolver a própria tecnologia, porém a adaptação local também demanda investimento, e, caso o sistema democrático do país em questão apresente fragilidades (o que geralmente ocorre), os problemas decorrentes dessa adaptação tecnológica dificilmente poderão ser corrigidos. Dessa forma, uma análise crítica relativa ao modelo de Tecnologia Apropriada apontou sua fragilidade com relação às mudanças estruturais nos modelos de desenvolvimento, principalmente com relação às estratégias que promovessem a superação de desigualdades sociais. Para Dagnino *et al.* (2004), a principal debilidade do conceito de Tecnologia Apropriada foi considerar que o simples alargamento de alternativas tecnológicas à disposição dos países periféricos poderia alterar a natureza do processo que preside à adoção da tecnologia. Sendo assim, foi desenvolvido o conceito de Tecnologia Social, que se refere a produtos, técnicas e metodologias desenvolvidas em interação com a comunidade, sendo também uma parte ativa do processo. Feenberg (2013) é um dos principais formuladores desse conceito, considerando que, para que haja a democratização da tecnologia é necessário introduzir novos valores e novos agentes na definição de processos e trajetórias tecnológicas. Sendo assim, consideramos o conceito de Tecnologia Social mais adequado para utilização

²²⁵ O conceito de Tecnologia Apropriada tem suas origens na Índia, tendo base no conceito de desenvolvimento realizado por Gandhi que incluía uma política científica e tecnológica explícita, tendo o intuito de gerar um melhoramento das técnicas locais por meio da adaptação da tecnologia moderna ao meio ambiente e às condições locais. Nas décadas de 1970 e 1980, houve uma proliferação do conceito de Tecnologia Apropriada com o objetivo de minimizar a pobreza em países periféricos por meio da importação e adaptação de artefatos tecnológicos dos países desenvolvidos. (DAGNINO *et al.*, 2004).

quando o objetivo é gerar modelos sociais inclusivos em detrimento de modelos que busquem apenas o lucro pela diminuição do custo de produção.

Dessa forma, a reconstrução do código técnico arquitetônico por meio de um código tectônico deve propiciar não somente a absorção de tecnologias digitais emergentes e sua incorporação no modo de produção vigente, mas buscar a construção de um olhar não colonizado, atendendo às demandas sociais concretas. Isto significa que os modelos de comunicação devem ser dialéticos e orientados para o contexto, de tal maneira a desenvolver propostas orientadas pela racionalidade de construção por meio de instrumentalização secundária. Caso contrário, as tecnologias digitais não passarão de ferramentas de instrumentalização primária, reforçando, por meio de processos conservativos, as relações de produção e seus aspectos nocivos.

4.2 O papel da Universidade

A Universidade tem um papel fundamental na desconstrução do controle hegemônico do processo tecnológico pelos atores privilegiados, cujo desenho arquitetônico constitui instrumento de controle do canteiro, mas que independe da interação dos arquitetos com os demais atores sociais para operar. Dessa forma, estimular relações de monólogo do arquiteto no ensino é uma decisão política que restringe a atuação efetiva da maior parte dos arquitetos nas decisões relativas à produção, favorecendo somente àqueles com posse de alto capital simbólico. A grande massa de arquitetos, cuja produção é altamente dependente das relações econômicas, é o centro da demanda por uma reconexão do processo de projeto arquitetônico com os demais agentes do setor da construção. Dessa forma, os arquitetos subordinados²²⁶ enquanto atores submissos, tendo praticamente obstruída sua participação nas decisões tecnológicas e no desenvolvimento industrial, resultam na proletarização do que antes era uma atividade liberal, gerando escassez de postos de trabalho, condições precárias de atuação e baixa remuneração.

²²⁶ Os jovens arquitetos que vendem sua força de trabalho passaram a se denominar nos EUA, de forma autodepreciativa, de *CAD monkeys* (ARANTES, 2012). Estas relações de trabalho exercidas por arquitetos subordinados, seja na venda de trabalho para arquitetos eminentes ou para a indústria, servem para que haja uma exploração por meio de mais-valia absoluta, pela ausência de regulamentação do trabalho, e de mais-valia relativa por meio da imposição à produção em geral, de maior quantidade e precisão necessária nos documentos de serviço.

Para corrigir os aspectos nocivos da construção social do campo da arquitetura, bem como fazer frente às pressões econômicas, é fundamental que o ensino corrobore com a criação de novas trajetórias, ampliando as possibilidades de atuação dos arquitetos. Para retificar essa trajetória tecnológica, em que projeção arquitetônica está desconectada do canteiro, Sérgio Ferro (2006) propôs uma trajetória de aprendizagem²²⁷ que consiste em uma conduta metodológica específica e experimental, que busca estreitar a imbricação entre o fazer e o conceber, praticar e pensar, experimentar e antecipar. Para tanto, Ferro (2006) primeiramente identifica as seguintes carências na formação vigente:

- A abordagem da construção baseia-se na análise dos produtos acabados;
- Os alunos não têm praticamente nenhum contato com os diversos atores da construção e com os problemas decorrentes;
- Falta de instrumentos no processo de concepção de projetos que permitam manipular materiais e formas de modo mais concreto, mais experimental.

Dessa forma, os professores e estudantes raramente têm chance de testar materialmente suas hipóteses, no que se refere à técnica de aplicação ou à modelização estrutural, o que não contribui para a inovação técnica nos canteiros de obra ou na indústria. Como hipótese pedagógica, Ferro (2006) propôs um ensino de projetos voltado para a pesquisa e a experimentação, em que a centralidade da aprendizagem deveria estar na compreensão do *fazer*, considerando primeiramente o estímulo propiciado pela experimentação e para a percepção do ato de trabalho e sua racionalização possível na forma do próprio projeto. Para tanto, o ensino deveria estar ancorado em um laboratório de sistemas construtivos, de tal maneira a facilitar a conexão dos arquitetos com o mercado da construção no nível da invenção e da inovação, de forma a promover uma ampliação da competência dos arquitetos por meio do diálogo com os fabricantes e a indústria.

No ensino baseado nas relações de monólogo e nos seus mecanismos de produção e reprodução, embora o projeto de arquitetura oriente a produção do espaço no canteiro, os arquitetos não conseguem estabelecer uma relação mais atuante com os outros agentes. Na

²²⁷ Essa proposta foi realizada como base do programa científico e pedagógico de “Grandes Ateliês” (1994) para a Escola de Arquitetura de Grenoble.

manufatura heterogênea, os arquitetos deixam de realizar importantes conexões com a indústria, e a conexão realizada com o canteiro não interfere na escolha das tecnologias de produção (FIG. 98).²²⁸ A relação dos arquitetos com a indústria de materiais e equipamentos é unilateral, não havendo desenvolvimento de produtos nem de equipamentos para o fornecimento e orientação da produção. O ensino de projetos arquitetônicos, ao privilegiar o foco na espacialidade e na plasticidade da forma, e, estimular as relações de monólogo, não desenvolve de maneira relevante pesquisas para o desenvolvimento de novos materiais, nem de processos inovadores para orientar a produção no canteiro. Sendo assim, essas conexões acabam sendo dominadas pelas escolas de engenharia, que o fazem com princípios de racionalidade instrumental primária.

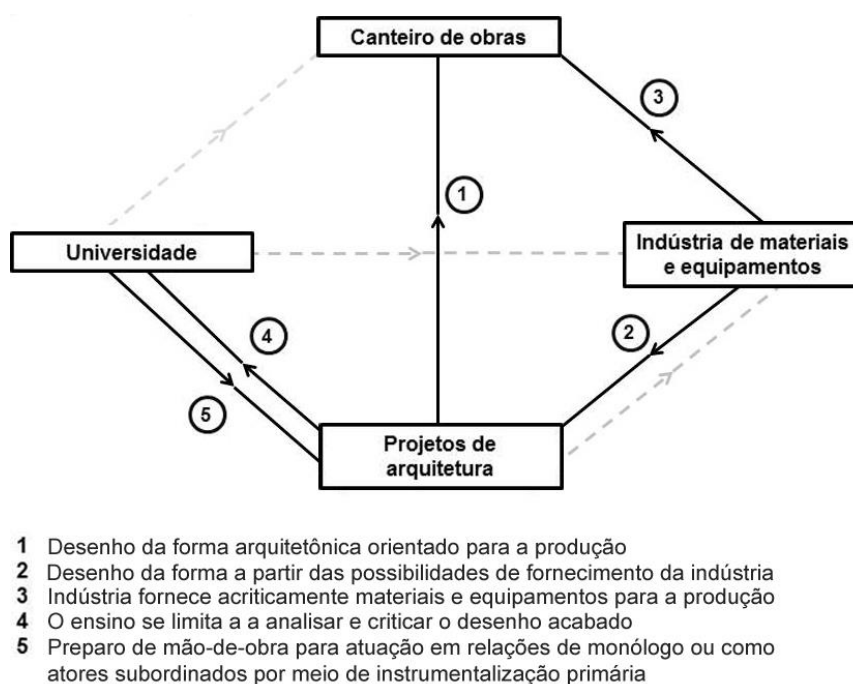


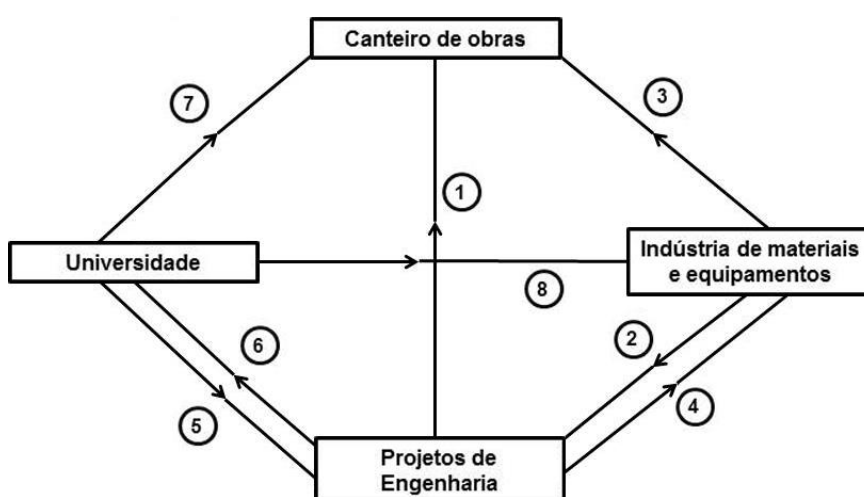
FIGURA 98 - O papel da arquitetura na produção em manufatura heterogênea
 Fonte: elaboração da autora

As escolas de engenharia²²⁹ têm conexões importantes tanto com a indústria como com o canteiro de obras, uma vez que realizam a seleção tecnológica da produção (FIG. 99). No

²²⁸ As análises realizadas se constituem de um esquema para visualizar a organização das relações entre os agentes da construção civil, e, a partir disso, vislumbrar uma potencial reconexão dos arquitetos com os demais agentes. Essas análises foram realizadas com base nas conexões setoriais desenvolvidas pelo economista Pavitt (1984), teórico de abordagem evolucionista da economia (APÊNDICE Q).

²²⁹ Neste caso, não vamos considerar apenas a engenharia civil, mas todas as engenharias tais como mecânica, elétrica, de produção, de materiais e de automação, que também fazem parte do contexto da produção no canteiro de obras.

entanto, essas escolhas realizadas com base em instrumentalização primária têm como objetivo a redução de custos da produção e o aumento do lucro por meio de processos que visam à eficiência para a execução das tarefas. Dessa maneira, toda a inovação, desde o projeto até o canteiro, é direcionada para otimização de tempo de produção e barateamento dos materiais, havendo pouca ou nenhuma crítica com relação ao contexto físico e social, à paisagem, às relações de trabalho e ao usuário. Esse modelo de instrumentalização primária não contribui para a inovação da organização do setor da construção civil uma vez que, de acordo com o economista Pavitt²³⁰ (1984), “as trajetórias tecnológicas mais fortes ocorrem quando a inovação é orientada para a inovação dos processos, e menos forte quando é orientada somente para uma redução de custos”²³¹.



- 1 Seleção tecnológica da produção por instrumentalização primária
- 2 Indústria fornece possibilidades para a seleção tecnológica realizada
- 3 Indústria fornece subsídios para a seleção tecnológica realizada
- 4 Seleção tecnológica pode implicar em desenvolvimento de produtos
- 5 Universidade prepara mão-de-obra por meio de instrumentalização primária
- 6 Pesquisas demandadas para solução de problemas existentes
- 7 Pesquisas orientadas para aperfeiçoamento de processos de instrumentalização primária
- 8 Desenvolvimento de novos produtos e equipamentos

FIGURA 99 - O papel da engenharia na produção em manufatura heterogênea
Fonte: elaboração da autora

Dessa forma, para que a trajetória tecnológica do setor da construção civil adquira potencial de inovação, é necessário que haja uma substituição do modelo de instrumentalização primária para um modelo de instrumentalização secundária na produção da arquitetura (FIG.

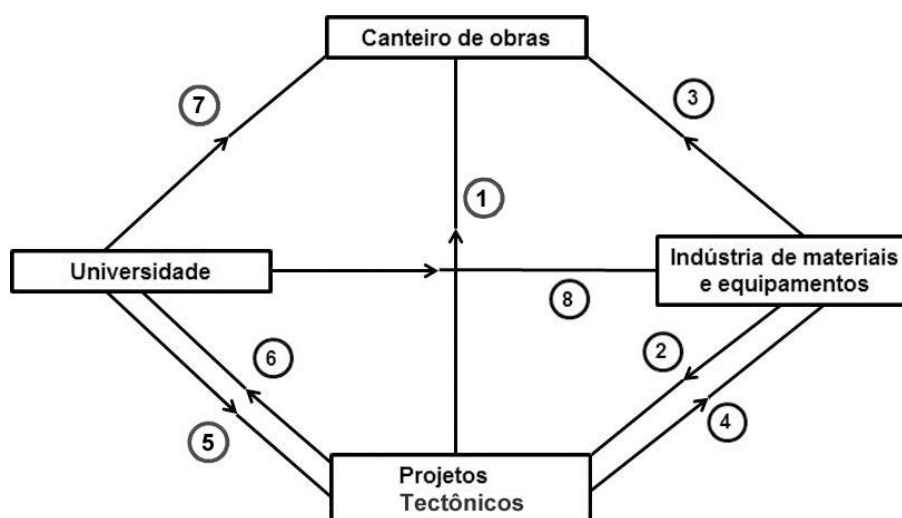
²³⁰ Keith Pavitt (1937-2002) foi economista e professor da área de Política Científica e Tecnológica na Universidade de Sussex, tendo sido pioneiro no desenvolvimento de novos métodos para medir inovação e mudanças tecnológicas.

²³¹ Tradução nossa.

100). Para isso, propomos que o potencial para a efetivação dessa substituição estaria na conformação de um código tectônico para a produção de projetos arquitetônicos cuja centralidade está no material e nas relações com os agentes do setor. Nessa configuração, os arquitetos, ao dominarem partes do código técnico que propicia a compreensão do material, deixam sua condição de subordinação na seleção e desenvolvimento tecnológico existente na manufatura, para propiciar uma atuação ativa, agregando valores éticos e estéticos ao processo, envolvendo assim questões políticas e econômicas, já que interferem no modo de produção.

De acordo com a construção pedagógica proposta por Ferro (2006), o estudo e a experimentação crítica do material e suas virtualidades intrínsecas ganham centralidade no processo. Por essas virtualidades, considera-se que o material é não só a matéria, mas também inclui as relações de trabalho que o conformam. Para Ferro (2006), o material traz em si as potencialidades e as contradições do construir, sendo necessário, entretanto, reconhecê-lo como uma ponte que une o saber e a experiência às indústrias da construção, aos interesses dos setores da produção, aos interesses dos trabalhadores e dos usuários.

Para Feenberg (2013), muitas configurações são possíveis para obter um equipamento tecnológico que cumpra sua função, sendo que as escolhas não devem ser orientadas por uma determinação positivista, mas devem ser socialmente relativizadas, tendo consciência de que o resultado das escolhas técnicas serve como sustentação para a conservação ou subversão do *habitus* dos grupos sociais. Sendo assim, as escolhas dos processos de ensino podem conservar as hierarquias existentes, por meio de sua reprodução e exclusão dos atores subjugados, ou miná-las, forçando-as a reconhecer necessidades ignoradas.



- 1 Desenho da produção em substituição ao desenho para a produção
- 2 Indústria fornece possibilidades para a seleção tecnológica realizada
- 3 Indústria fornece subsídios para a seleção tecnológica realizada
- 4 Desenvolvimento de produtos com princípios de instrumentalização secundária
- 5 Universidade prepara mão-de-obra por meio de instrumentalização secundária
- 6 Pesquisas para solução de problemas do contexto
- 7 Pesquisas orientadas para aperfeiçoamento de processos de instrumentalização secundária
- 8 Desenvolvimento de novos produtos e equipamentos que atendam aos processos de instrumentalização secundária

FIGURA 100 - Potencial de construção de processos de instrumentalização secundária na construção civil por meio de projeção tectônica
 Fonte: elaboração da autora

Menges (2015) considera que a aproximação virtual da materialidade, através da incorporação da lógica construtiva e de manufatura como um comportamento que guia o projeto, permite que os arquitetos explorem relações complexas entre o desenvolvimento da forma e suas possibilidades de materialização, baseados em lógicas processuais e comportamentais. Para Ferro (2006), a experimentação, o ensaio e a experimentação no canteiro na prática do ensino têm o potencial de reaproximar “arte” e “técnica”, por meio da poética, que no sentido da *poiesis* grega, significa *o fazer*. Para tanto, o ensino de projeção arquitetônica deve insistir no canteiro, no *fazer* e na poética, compreendendo que a arquitetura é o resultado de um trabalho coletivo conformado por uma estrutura com inúmeras possibilidades, em que cada componente determina e é determinado por todos os outros, e que toda mudança importante em um componente implica reajuste dos demais, fazendo surgir outra estrutura de produção e reprodução do campo.

Feenberg (2013) acredita que um novo tipo de política tecnológica pode ser realizado por meio de uma condução interna do sistema, não por uma revolução massiva, mas a partir de

sutis hibridizações. De acordo com Dubberly e Pangaro (2015a), ao projetar ambientes interativos como extensões computacionais da agência humana ou novos discursos sociais para governar a mudança social, os processos de segunda ordem facilitam a emergência de condições em que outros podem projetar, criando condições nas quais as conversas possam emergir, aumentando assim o número de opções abertas a todos. Dessa maneira, acreditamos que as hibridizações no ensino por meio do destrancamento e da fusão de algumas partes dos códigos técnicos da engenharia e da arquitetura, facilitados pelas ferramentas digitais, representam os graus de liberdade que possibilitam uma reconstrução corretiva do sistema tecnológico em direção à construção de processos não conservativos de instrumentalização secundária para ambos os profissionais, tendo em vista a construção de processos democráticos de projeto. Somente quando se busca romper com a hegemonia dos valores que regem os códigos técnicos é que torna se possível a emergência de apropriações alternativas, e, até mesmo, a criação de novos códigos, incorporando novos conjuntos de valores sociais que possam ser tecnologicamente e socialmente sustentados. Assim, para que o processo seja efetivamente democrático, a emergência de um código tectônico deve reconhecer todos os agentes participantes na construção do espaço, inclusive os usuários como participantes ativos do processo de projeto-decisão-construção, e não apenas consumidores, contribuindo para que estes modifiquem, aumentem ou até mesmo criem seus ambientes, por meio de compartilhamento, adaptação e execução do código.

Sendo assim, ficamos com a circularidade e a recursividade da conversa expandida.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A separação entre o ensino de projeto arquitetônico e o ensino de estruturas corrobora com a divisão do trabalho na prática profissional, reforçando assim padrões socioculturais que não têm capacidade de suportar o desenvolvimento de relações dialéticas entre arquitetos e engenheiros. A formação do engenheiro é estruturada de forma linear, com disciplinas de fundamentação teórica voltadas para a compreensão da física e da matemática. Os estudantes de engenharia raramente lidam com ambiguidades e incertezas, o que os leva a assumir uma postura na prática profissional de que os problemas a serem enfrentados possuem de maneira geral uma única solução, geralmente apresentada sob o viés da racionalidade instrumental. O ensino de arquitetura, por sua vez, está focado no desenvolvimento de projetos, permeado por problemas ambíguos e incertos, em que a aquisição de habilidades não decorre de um processo linear de aquisição de conhecimentos, mas por meio de processos circulares, em que preponderam valores estéticos e éticos na tomada de decisões.

As relações de monólogo entre arquitetos e engenheiros, tanto na prática profissional quanto no ensino, conservam e fazem prevalecer a impermeabilidade de seus códigos técnicos. Os arquitetos com alto capital simbólico desenvolvem relações de colaboração com os engenheiros quando procuram desenvolver projetos de apelo estético formal dentro da tradição. Nessas relações, os arquitetos não necessitam interferir na seleção tecnológica ou se conectar a outros agentes, uma vez que a seleção realizada pelo engenheiro buscará corroborar para a reprodução fiel da forma plástica proposta pelo arquiteto. Já, quando os

arquitetos com alto capital simbólico buscam uma posição no campo por meio da inovação, principalmente quando a estrutura adquire um caráter ornamental ou expressivo, eles tendem a desenvolver uma relação de cooperação com o engenheiro de estruturas. Nesse caso, a seleção tecnológica não somente será realizada para corroborar com o projeto de arquitetura; o processo pode inclusive suscitar o desenvolvimento de tecnologias na engenharia de tal maneira que viabilize a plasticidade da proposta arquitetônica construtivamente.

Nessas duas possibilidades de produção restrita por meio de relações de monólogo, o diálogo está baseado na relação de poder do arquiteto sobre o engenheiro. Dessa maneira, na produção de obras de capital simbólico, a eficiência e o lucro não são valores preponderantes, mas sim a articulação do espaço e a plasticidade da forma proposta pelo arquiteto. O ensino de estruturas na arquitetura privilegia esse tipo de relação, seja estimulando a concepção estrutural ornamental ou desestimulando que os arquitetos incorporem valores relacionados ao material e à construção na síntese projetual.

No entanto, a grande massa de arquitetos não possui alto valor de capital simbólico, estando dessa maneira submetidos a relações de monólogo inversas. Nessas relações, os engenheiros detêm o controle da seleção tecnológica e da produção, e o fazem por meio de instrumentalização primária. Nesses casos, os valores incorporados ao projeto arquitetônico podem ser subjugados ou até mesmo distorcidos em detrimento das escolhas tecnológicas que melhor atendam às relações de mercado, refletindo-se na qualidade dos objetos produzidos. Essa produção, geralmente orientada para a arquitetura ordinária, é a que mais tem perdas com relação aos valores éticos e estéticos, uma vez que as decisões centrais estão orientadas para a diminuição de custos e obtenção do lucro.

As ferramentas digitais incorporadas ao processo de projeção apresentam um potencial para a reconstrução do modelo vigente por meio do desenvolvimento de práticas não conservativas, possibilitando uma base comum para o desenvolvimento de relações dialógicas e dialéticas entre arquitetos e os demais agentes da construção. No entanto, a instrumentalização primária dos arquitetos para o desenvolvimento de modelos computacionais processuais mais eficientes, por exemplo, o uso de ferramentas digitais que

possibilitam um maior controle gerencial da representação das características físicas e funcionais dos objetos projetados, sem uma reorientação para a reconstrução do processo de projeção e das relações entre os agentes, atende somente à extração de mais-valia relativa do trabalho de arquitetos subordinados.

Logo, o potencial integrativo da ferramenta para a construção de projetos em rede tem somente um viés instrumental primário, porém poderia ser explorado na construção de processos de instrumentalização secundária orientados, de acordo com Ferro (2006), para a produção de desenhos da construção em substituição à produção de desenhos para a produção, corrigindo assim a trajetória de marginalidade e subordinação da arquitetura e dos arquitetos com relação à seleção tecnológica na produção da construção civil. Dessa mesma forma, a produção de produtos por meio de métodos de otimização do tipo *top-down* ou *bottom-up* pode ser orientada não somente para a proposição de formas complexas visando a uma inovação estética para obras de capital restrito por meio de relações de monólogo, mas reorientados para uma produção tectônica com princípios vernaculares.

Assim, as propostas de hibridizações no ensino de projetos realizadas nesta tese pressupõem um deslocamento da centralidade dada aos princípios plásticos e espaciais da forma arquitetônica para o desenvolvimento de abordagens orientadas para o reconhecimento do material e das questões construtivas. Para tanto, de maneira a possibilitar a realização dos experimentos, foi necessário realizar um destrancamento parcial do código técnico da engenharia de estruturas por meio da aprendizagem de métodos computacionais de análise estrutural, de tal maneira que o acesso a informações avaliativas do comportamento estrutural pudesse ser incorporado como informação para a síntese arquitetônica.

Os processos lineares de *conhecer-na-ação* possibilitaram reconhecer o modo operatório da relação entre o ensino de projeto arquitetônico e o ensino de estruturas. Por meio desses foi possível criar um processo circular e reflexivo de autorregulação internamente e externamente aos experimentos, de maneira a delinear um potencial horizonte para uma reconstrução das relações entre engenheiros e arquitetos na prática de projeção arquitetônica, com o intuito de transformá-la em práticas de conversa. A experimentação efetivada por meio do ensino procurou realizar uma diversidade de práticas buscando

compreender como a aprendizagem de *softwares* de análise estrutural poderia contribuir para a prática de projeto arquitetônico. Além de ter propiciado o destrancamento parcial do código técnico da engenharia de estruturas, a construção do sistema de aprendizagem autorregulado por meio da prática de *experimentação-na-ação* fez aparecer carências e aspectos não tratados no ensino, o que propiciou que surgissem, sucessivamente, novos questionamentos e possibilidades para a construção de novas abordagens, buscando trabalhar as relações de forma, força, material e realização da produção.

As experimentações, a princípio, foram baseadas na relação entre *homem-máquina*, em que a hipótese inicial era que somente tal interação promoveria a circularidade e a recursividade do processo. O experimento inicial que denominamos como *Experimento Exploratório* serviu para confirmar a necessidade de revisão nos métodos de ensino de estruturas, uma vez que o método analítico utilizado sem a articulação com outros métodos não propicia o engajamento e a conversa com a projeção arquitetônica. No experimento focado em método experimental, os resultados com relação à aprendizagem do material e das relações de forma e força foram parcialmente satisfatórios, mas se mostrou ineficiente na transposição do conhecimento para a prática de projeto. Os experimentos realizados como *Teste de Movimento* confirmaram a interferência positiva que os *softwares* de análise estrutural trazem para o processo de aprendizagem do comportamento estrutural, mas apontaram a necessidade de incluir o engenheiro de estruturas como um ator participante, uma vez que para uma leitura mais sofisticada dos resultados do *software* de tal maneira que as informações se tornassem *input* do processo de síntese arquitetônica, seria necessário haver uma conversa dialética, o que não é possível realizar somente na interação *homem-máquina*.

A incorporação do engenheiro de estruturas no processo foi fundamental para que percebêssemos esta interação como uma potencial relação de conversa nos moldes do modelo baseado na abordagem cibernética da Teoria da Conversação desenvolvida por Pask (1976a). Para tanto, foi necessário estruturar a análise dos experimentos de acordo com o modelo desenvolvido por Pangaro (2009). A conversa *homem-máquina-homem* possibilitou aos alunos de arquitetura não somente o destrancamento parcial do código técnico, mas os capacitou para o diálogo com o engenheiro por meio de aprendizagem de uma linguagem comum, tornando possível, por meio de acordo e engajamento, a efetivação de trocas

comunicativas de ação e transação. As ferramentas digitais foram fundamentais neste processo, tendo propiciado um contexto comum de projeção. No *Teste de Hipóteses*, verificamos que a ferramenta computacional paramétrica foi a que melhor atendeu à proposta da conversa, uma vez que a circularidade e a recursividade puderam ser explicitadas em processos de projeto orientados pelo reconhecimento e *performance* do material. Essa orientação do projeto levou os alunos a se engajarem nas questões relativas à tectônica da forma, de tal maneira que fez emergir a necessidade de expansão da conversa para práticas laboratoriais e no canteiro, sendo necessária uma conexão com outros agentes que não somente o engenheiro de estruturas.

A conexão com outros agentes pode ocorrer por meio do estudo de componentes para a indústria ou para o desenvolvimento de processos para o canteiro. No entanto, ao trabalhar com a incorporação de valores éticos e estéticos, a conexão realizada pelos arquitetos difere da conexão realizada pelos engenheiros, que o fazem por instrumentalização primária. Já as conexões com os agentes realizadas pelos arquitetos têm o potencial de desenvolver processos de instrumentalização secundária. Desta maneira, concluímos que as novas ferramentas digitais isoladamente não determinam uma revisão tecnológica, mas propiciam uma facilitação e reorganização comunicativa em prol do desenvolvimento de processos de projeção tectônicos.

Sendo assim, para a construção de processos de instrumentalização secundária, é necessário que a universidade construa modelos de ensino não conservativos, de tal maneira que possibilite que ocorram trocas dialéticas entre professores e estudantes de arquitetura e de engenharia na prática de projeção, em processos que orientem a produção no canteiro. Para tanto, é necessário que a arquitetura também disponibilize o acesso de parte de seu código para os engenheiros. O acesso parcial aos códigos técnicos possibilita, potencialmente, a construção de um código tectônico que leve à construção de novos modelos de projeção, podendo incluir os trabalhadores e os usuários nas decisões de projeto, criando trajetórias tecnológicas inovadoras e democráticas que emergem do próprio contexto.

Logo, encerramos esta tese propondo que novos processos de aprendizagem por meio de *experimentação-na-ação* sejam construídos para o ensino de projetos. Estes processos devem

ser realizados incorporando novos agentes e novas reflexões que irão emergir dos seus contextos de aplicação, de tal maneira que propiciem o surgimento de novas abordagens e novas respostas para as perguntas relativas à *porque* conversar e *como* conversar na prática de projeção arquitetônica. Assim, as relações de conversa deverão ser orientadas para o desenvolvimento de processos de projeção abertos e inclusivos, podendo ser trabalhadas da escala do material até a escala do planejamento urbano.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ACHÁ, E.F.A.; BORBA, I.M.M.; TAMASHIRO, H.A. **O ensino de desenho arquitetônico através do entendimento técnico-constructivo**. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE ESTRUTURAS EM ESCOLAS DE ARQUITETURA, 3., 2017, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto, 2017. p. 1089-1104.

ADRIAENSSENS, S.; BLOCK, P.; VEENENDAAL, D.; WILLIAMS, C. (Ed.) **Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization**. Oxon: Routledge.

ALMEIDA, M. C. F. **Estruturas Isostáticas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

ANDERSSON, K. I.; KIRKEGAARD, P. H. A discussion of the term digital tectonics. *In*: ALI, A.; BREBBIA, C.A. (Ed.). **Digital Architecture and Construction**. [S.l.]: WIT Press, 2006. p.29-40

ARANTES, F. A. Qual futuro para o Canteiro Experimental? *In*: **Canteiro experimental: 10 anos na FAU USP / apresentação de Reginaldo Ronconi** - São Paulo: FAUUSP, 2008.

ARANTES, P.F. **Arquitetura na era digital-financeira: desenho, canteiro e renda da forma**. São Paulo: Editora 34, 2012.

AU, F. A Necessary Resistance within Architect-Engineer Collaboration. *In*: KARA, H; GEORGOULIAS, A. (Ed.) **Interdisciplinary Design: New Lessons from Architecture and Engineering**. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Graduate School of Design, 2012. p. 236-242.

BALMOND, C. **Informal**. Munique; Berlim; Londres; Nova Iorque: Prestel Verlag, 2002.

BALMOND, C. **Crossover**. Munique; Londres; Nova Iorque: Prestel Verlag, 2013.

BAUMBERGER, C. Structural Concepts and Spatial Design: On the Relationship Between Architect and Engineer. *In*: FLURY, A. (Ed.) **Cooperation: The Engineer and the Architect**. Basel: Birkhäuser, 2012. p. 57-74.

BECHTHOLD, M. Performalism or performance-based design? In: GROBMAN, Y, J; NEUMAN, E. (Ed.) **Performalism: Form and Performance in Digital Architecture**. Oxon: Routledge, 2012. p. 49-52.

BENEVOLO, L. **História da Arquitetura Moderna**. São Paulo: Perspectiva, 1976.

BLACK, G.; DUFF, S. A Model for Teaching Structures: Finite Element Analysis in Architectural Education. **Journal of Architectural Education (1984-)**, v. 48, n. 1, p. 38-55, Sep., 1994. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1425308>. Acesso em: 16 dez. 2018.

BONNER, J. Death of The Star Architect. *In*: KARA, H; GEORGOULIAS, A. (Ed.) **Interdisciplinary Design: New Lessons from Architecture and Engineering**. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Graduate School of Design, 2012. p. 226-230.

BORGES, M. **Design estrutural baseado em desempenho aplicado ao desenvolvimento de estrutura de torre eólica**. Orientador: Ricardo Hallal Fakury. 2015. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

BORGES, M. F.; GRILO, L. F.; FAKURY, R. H. Metodologia e validação de design estrutural baseado em desempenho para concepção de estrutura de torre eólica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 35-50, out./dez. 2016.

BOURDIEU, P. O capital social: notas provisórias. *In*: NOGUEIRA, M.; CATANI, A. (Orgs.). **Escritos de educação**. Petrópolis: Vozes, 1980. p. 65-69 (3. ed., 2001).

BURRY, J.; BURRY, M. **The New Mathematics of Architecture**. Nova York: Tames& Hudson, 2010.

CAGE, JOHN: Variations V. **Medien Kunst Netz**, 2004. Seção Works. Disponível em: <http://www.medienkunstnetz.de/works/variations-v/>. Acesso em: 04 abr. 2019.

CARPO, M. **The alphabet and the algorithm**. Cambridge: MIT Press, 2011.

DAGNINO, R. P.; BRANDÃO, F. C.; NOVAES, H. T. Sobre o marco analítico-conceitual da tecnologia social. *In*: LASSANCE JR. *et al.* (Org.). **Tecnologia social: uma estratégia para o desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Fundação Banco do Brasil, 2004, p.15-64.

DAGNINO, R. **Tecnologia Social: contribuições conceituais e metodológicas**. Campina Grande: EDUEPB, 2014. Disponível em: <http://books.scielo.org/id/7hbd>. Acesso em: 12 jul. 2019.

DAVIS, D. **A History of Parametric**. 2013. Disponível em: <http://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>. Acesso em: 28 fev. 2019.

DELANDA, M. Material Complexity. In: LEACH, N.; TURNBULL, D.; WILLIAMS, C. **Digital Tectonics**. Londres: Wiley-Academy, 2004. p. 14-21.

DÍAZ, E. **The Experimenters**: chance and design at Black Mountain College. Chicago: The University of Chicago Press, 2015.

DUBBERLY, H.; HAQUE, U.; PANGARO, P. What is interaction? Are there different types? **Interactions Magazine**, v. 16.1, p. 1-10, jan. 2009. Disponível em <http://www.dubberly.com/articles/what-is-interaction.html>. Acesso em: 16 jun. 2018.

DUBBERLY, H.; PANGARO, P. What is Conversation? How can we design for effective conversation? **Interactions Magazine**, v. 16.4, p. 22, jul./ago. 2009. Disponível em: <http://www.dubberly.com/articles/what-is-conversation.html>. Acesso em: 30 jun. 2018.

DUBBERLY, H.; PANGARO, P. Cybernetics and Design: Conversations for Action. **Cybernetics and Human Knowing**, v.22, n. 2-3, p. 73-82, 2015a. Disponível em <http://www.dubberly.com/articles/cybernetics-and-design.html>. Acesso em: 30 jun. 2018.

DUBBERLY, H.; PANGARO, P. How cybernetics connects computing, counterculture, and design. In: BLAUVELT, A.; CASTILLO, G.; CHOI, E. (Ed.) **Hippie modernism**: The struggle for utopia. Minneapolis: [s.n.], 2015b. p. 126-141.

ENGEL, Heino. **Sistemas Estruturais**. Barcelona: Editora Gustavo Gili, 2001.

FAKURY, R.; CASTRO E SILVA, A.; CALDAS, R. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço e Mistos de Aço e Concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

FEENBERG, A. Racionalização subversiva: tecnologia, poder e democracia. In: NEDER, R. (Org.) **A teoria crítica de Andrew Feenberg**: racionalização democrática, poder e tecnologia. 2. Ed. Brasília: Observatório do Movimento pela Tecnologia Social na América Latina; CDS; UnB; Capes, 2013.

FERREIRA-ALVES, J.; GONÇALVES, O. **Educação Narrativa do Professor**. Coimbra: Quarteto, 2001.

FERRO, S. **Arquitetura e Trabalho Livre**. São Paulo: Cosac Naify, 2006.

FERRO, S. **A história da arquitetura vista do canteiro**: três aulas de Sérgio Ferro. São Paulo: GFAU, 2010.

FLURY, A. Inquisitive Openness. In: FLURY, A. (Ed.) **Cooperation**: The Engineer and the Architect. Basel: Birkhäuser, 2012. p. 09-18.

FOERSTER, H. **Ethics and second-order cybernetics**. In: FOERSTER, H. Understanding Understanding. Nova York: Springer-Verlag, 2003.

FOSTER, H. **O complexo arte-arquitetura**. São Paulo: Cosac Naify, 2015.

FRAMPTON, K. **Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture**. Cambridge: The MIT Press, 1995.

FRAZER, J. The Architectural Relevance of Cyberspace (1995). *In*: CARPO, M. (Ed.) **The Digital Turn in Architecture 1992-2012**. Londres: John Wiley & Sons, 2013. p. 48-56.

FREITAS, M. Tectônica da Arquitetura: um caminho possível para o ensino de estruturas em Escolas de Arquitetura? *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE ESTRUTURAS EM ESCOLAS DE ARQUITETURA, 3., 2017, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto, 2017, p. 109-125.

GEORGOULIAS, A. Learning from Design. *In*: KARA, H; GEORGOULIAS, A. (Ed.) **Interdisciplinary Design: New Lessons from Architecture and Engineering**. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Graduate School of Design, 2012. p. 16-39.

GLANVILLE, R. Try again. Fail again. Fail better: the cybernetics in design and the design in cybernetics. 2007. **Kybernetes**, v. 36, n. 9/10, p.1173–1206, 2007. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/03684920710827238>. Acesso em novembro de 2018.

GMP ARCHITECTS. **Stuttgart Terminal 3**. Disponível em <https://www.gmp-architects.vn/du-an/flughafen-stuttgart-terminal-3/>. Acesso em 12 de junho de 2019.

GRASSHOPER. **Grasshopper: algorithmic modeling for Rhino**. Versão 5.0. Nova York: David Rutten, 2012. Disponível em: <http://www.rhino3d.com/download/grasshopper/1.0/wip/rc>. Acesso 12 fev. 2013.

GROBMAN, Y. J. The various dimensions of the concept of “*performance*” in architecture. *In*: GROBMAN, Y, J; NEUMAN, E. (Ed.) **Performatism: Form and Performance in Digital Architecture**. Oxon: Routledge, 2012. p. 9-13

HABRAKEN, N. **Supports: an alternative to mass housing**. Londres: Architectural Press, 1972.

IACC. **Structural Vault Analysis**. 2014. Disponível em: <http://www.iaacblog.com/programs/structural-vault-analysis/>. Acesso em: 15 mai. 2019.

KAPP, S.; SANTOS, R.; SILVA, A. O sonho da intuição estrutural ou a nostalgia do canteiro no desenho. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE ESTRUTURAS EM ESCOLAS DE ARQUITETURA, 3., 2017, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto, 2017. p. 826-842.

KANGAROO. **Kangaroo 3D**. Versão 2.42. Disponível em: <http://kangaroo3d.com/>. Acesso em: ago. 2018.

KARA, H. Redesigning Attitudes. *In*: KARA, H; GEORGOULIAS, A. (Ed.) **Interdisciplinary Design: New Lessons from Architecture and Engineering**. Cambridge, Massachusetts: Harvard

University Graduate School of Design, 2012. p. 10-15.

KARA, H. The “Pink Noise” of Design Engineering. *In: KARA, H. BOSIA, D. (Ed.) Design Engineering Refocused.* Londres: John Wiley & Sons, 2016. p. 14-33

KARAMBA. **Karamba 3D:** parametric engineering. Versão 1.3.1. Viena: Clemens Preisinger e Bollinger und Grohmann ZT GmbH, 2012. Disponível em: <https://www.karamba3d.com/download/>. Acesso em: 13 out. 2018.

KOLAREVIC, B. **Performative Architecture Beyond Instrumentality.** Nova Iorque: Spon, 2005.

KOLAREVIC, B. Computing the performance. *In: OXMAN, R; OXMAN. (Ed.) Theories of the Digital in Architecture.* Oxon: Routledge, 2014. p. 103-112.

KOTSIORIS, E. Toward a New Sobriety: Rebel Engineering with a Cause. *In: KARA, H; GEORGOULIAS, A. (Ed.) Interdisciplinary Design: New Lessons from Architecture and Engineering.* Cambridge, Massachusetts: Harvard University Graduate School of Design, 2012. p. 65-69.

LAWSON, B. **How designers think:** the design process demystified. Oxford: Architectural Press, 1997.

LEACH, N.; TURNBULL, D.; WILLIAMS, C. **Digital Tectonics.** Londres: John Wiley & Sons Inc, 2004.

LE CORBUSIER. **Vers une Architecture.** 11. ed. Paris: Les editions G. Crès et C, 1925.

LOPES, D. M. C; VAZ-REBELO, M. P.; PESSOA, M. T. R. O ensino superior na atualidade e os desafios da aprendizagem: teorias e prática docente. *In: Revista Portuguesa de Pedagogia*, ano 44-1, 2010. p. 143-167.

MARTINS, L. D. **A utilização da arquitetura High Low na criação de elementos construtivos alternativos.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Arquitetura e Urbanismo). 2018. Universidade Federal de São João Del Rey, São João Del Rey, 2018.

MARTINS, L. D.; BORGES, M. *The use of High Low Architecture in the Creation of Alternative Construction Elements.* *In: CONGRESSO DA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL: Technopolíticas*, 22., 07-09 nov. 2018, São Carlos – SP. **Anais...** São Carlos-SP, 07-09 NOV. 2018. p. 367-374.

MAVER, T. W. PACE 1: Computer Aided Design Appraisal. *In: The Architects Journal.* AJ. Londres: EMAP Publishing Ltd., 1971.

MAVER, T. W. Evaluation of Design Performance. *In: Performance of Conference ja Metodologii Projektowania.* Warsaw, Polônia, 1974.

MENGES, A.; AHLQUIST, S. Computational Design Thinking. *In: MENGES, A.; AHLQUIST, S.*

(Ed.) **Computational Design Thinking**. Londres: John Wiley & Sons, 2011. p. 10-29.

MENGES, A. Towards a Novel Material Culture. *In*: MENGES, A. (Ed.) **Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational**. Londres: Architectural *Design*, 2015. p. 9-15

MITCHELL W.J., Antitectonics: The Poetics of Virtuality, *In*: BECKMANN, J. (ed.) **The Virtual Dimension: Architecture, Representation, and Crash Culture**. Nova York: Princeton Architecture Press, 1998.

MONTANER, J. M. **A condição contemporânea da arquitetura**. São Paulo: Gustavo Gili, 2016.

MONTANER, J. M. **Do diagrama às experiências, rumo à uma arquitetura de ação**. São Paulo: Gustavo Gili, 2017.

MORAIS, L. P. Z. Next 21. Experimentações em espacialidades habitacionais. **Arquitextos**, São Paulo, ano 18, n. 213.04, fev. 2018. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/18.213/6899>. Acesso em: 13 jul. 2019.

MORIN, E. **Introdução ao pensamento complexo**. Porto Alegre: Editora sulina, 2007.

MOUSSAVI, F. **The Function of Form**. New York: Harvard University, 2009.

NAGY, D. Towards a Parametric Planning. **Urban Magazine: Towards a Collective Purpose**, v. 12, n. 2, p. 10–18, 2009. Disponível em: <https://danilnagy.wordpress.com/towards-a-parametric-planning/>. Acesso em: 12 nov. 2018.

NEGROPONDE, N. Towards a Humanism Through Machines (1969). *In*: MENGES, A.; AHLQUIST, S. (Ed.) **Computational Design Thinking**, 2011. Londres: John Wiley & Sons, 2011. p. 10-29.

OCHSENDORF, J. Engineering as Exploration. *In*: KARA, H. BOSIA, D. (Ed.) **Design Engineering Refocused**. Londres: John Wiley & Sons, 2016. p. 10-11.

OLIVEIRA, M. S.; SARMANHO, A. Desenvolvimento e validação de um modelo estrutural qualitativo para o ensino de estruturas. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE ESTRUTURAS EM ESCOLAS DE ARQUITETURA, 3., 2017, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto, 2017. p. 760-775.

OXMAN, R. Theory and design in the first age. **Design Studies**, v. 27, n. 3, p. 229-265, 2006.

OXMAN, R. Performance-based design: current practices and research issues. **International Journal of Architectural Computing**, v. 6, n. 1, p. 1-17, 2008.

OXMAN, R.; OXMAN, R. (Ed.). **The New Structuralism: design, engineering, and architectural**

technologies. Londres: Architectural Design, Special Issue: v. 80, n.4, mar – abr, 2010.

OXMAN, R; OXMAN, R. Theory. *In*: OXMAN, R; OXMAN. (Ed.) **Theories of the Digital in Architecture**. Oxon: Routledge, 2014. p. 11-16.

OXMAN, R. Informed Tectonics in Material-based Design. *In*: OXMAN, R; OXMAN. (Ed.) **Theories of the Digital in Architecture**. Oxon: Routledge, 2014. p. 227-250.

PANGARO, P. *How Can I Put That? Applying Cybernetics to “Conversational Media”*. **American Society for Cybernetics**, Washington, 2009. Disponível em <http://www.pangaro.com/published/Applying-Cybernetics-to-Conversational-Media-Pangaro.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2018.

PANGARO, P. Design for Conversations & Conversations for Design. *In*: **coThinkTank**, Berlin, 2011. Disponível em: <http://pangaro.com/conversations-for-innovation.html>. Acesso em 30 jun. 2018.

PANGARO, P. Questions for Conversation Theory or Conversation Theory in One Hour. **Kybernetes**, v. 46, n. 9, p.1578-1587, 2017. Disponível em: http://www.pangaro.com/published/Pangaro%E2%80%93Questions-for-Conversation_Theory_In_One_Hour-Kybernetes_2017.pdf. Acesso em: 30 jun. 2018.

PAPERT, S. **Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas**. New York: Basic Books, 1980.

PAPERT, S.; HAREL, I. **Constructionism**. Nova York: Ablex Publishing Corporation, 1991. Disponível em: <http://www.papert.org/articles/SituatingConstructionism.html>. Acesso em: jan. 2019.

PAPERT, S. **The Children’s Machine**. New York: Basic Books, 1993.

PASK, G. The Architectural Relevance of Cybernetics. **Architectural Design**, n.7/6, 1969. p. 494-496. Disponível em: http://www.nomads.usp.br/pesquisas/cultura_digital/arquitetura_e_cibernetica/textos%20linkados/pask_architectural%20relevance%20of%20cybernetics.pdf. Acesso em: 21 set. 2019.

PASK, G. **Conversation Theory: applications in education and epistemology**. Amsterdam: Elsevier, 1976a.

PASK, G. Conversational techniques in the study and practice of education. **British Journal of Educational Psychology**, v. 46, n.1, 1976, p. 12-25, 1976b.

PASK, G. Developments in Conversation Theory: actual and potential applications. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED SYSTEMS RESEARCH AND CYBERNETICS, dez. 1980,

Acapulco. **Anais...** Acapulco, dez. 1980. Disponível em: <http://pangaro.com/pask-pdfs.html>. Acesso em: 30 jun. 2018.

PASK, G. **Conversation and Support**. In: Research Programme Ondersteuning Overleving & Cultuur (OOC). Universiteit Amsterdam, p. 1-42, 1987. Disponível em: <http://pangaro.com/pask-pdfs.html>. Acesso em: 17 jul. 2019.

PATTETA, L. Considerações sobre o Ecletismo na Europa. In: FABRIS, A. (org) **Ecletismo na Arquitetura Brasileira**. São Paulo: Studio Nobel, 1997.

PAVITT, K. Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory, **Research Policy**, n. 13, p. 343-373, 1984,

PEDRESCHI, R. Form, force and structure: a brief history. In: HENSEL, M.; MENGES, A. **Versatility and Vicissitude: Performance in morpho-ecological Design**. Londres: Architectural Design, 2008. p.12-19.

PELLI, V. S. Notas para uma tecnologia Apropriada à Construção na América Latina. In: MASCARÓ, L. (coord.); PELLI, V. S.; VIANNA, N.S.N; KATINSKY, J.; TURNER, J.F.C.; MASCARÓ, J.L. **Tecnologia e Arquitetura**. São Paulo: Nobel, 1990.p.11-32.

PENZEL, C. The Culture of Construction: Examples from the Last Fifty Years of a Remarkable Development. In: FLURY, A. (Ed.) **Cooperation: The Engineer and the Architect**. Basel: Birkhäuser, 2012. p. 41-56.

PERFORMANCE. **Oxford Dictionaries**, 17 mar. 2017. *Online*. Disponível em: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/performance>. Acesso em: 04 mar. 2019.

PETERS, B; PETERS, T. **Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design**. Londres: Architectural Design, 2013.

PIAGET, J. **Estudos sociológicos**. Rio de Janeiro: Forense, 1973.

PIAGET, J. **Seis estudos de psicologia**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2003.

PICON, A. **Digital Culture in Architecture: an introduction for the design professions**. Basel: Birkhäuser GmbH, 2010.

PICON, A. Architecture and Mathematics: Between Hubris and Restraint. Londres: **Architectural Design**, v. 81, p. 28-35, jul. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/278188147_Architecture_and_Mathematics_Between_Hubris_and_Restraint. Acesso em: 14 jul. 2019.

PICON, A. Architecture as performative art. In: GROBMAN, Y, J; NEUMAN, E. (Ed.) **Performativism: Form and Performance in Digital Architecture**. Oxon: Routledge, 2012. p. 15-

19.

POGACNIK, M. Technology as a Means of Expression in the Nineteenth Century – Architects and Engineers in Dialogue. *In*: FLURY, A. (Ed.) **Cooperation: The Engineer and the Architect**. Basel: Birkhäuser, 2012. p. 19-32.

PUCMG, DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E URBANISMO. **Curso de Graduação em Arquitetura e Urbanismo - Projeto Pedagógico**. Belo Horizonte: PUCMG, 2008.

REBELLO, Y. **Concepção Estrutural e a Arquitetura**. São Paulo: Zigurate, 2000.

REBELLO, Y. **Bases para o projeto estrutural**. São Paulo: Zigurate, 2007.

REBELLO, Y. **Estruturas de aço, concreto e madeira**: atendimento da expectativa dimensional. 3 ed. São Paulo: Zigurate, 2008.

RESENDE, C.; VELOSO, M. A concepção estrutural no processo de aprendizagem do projeto de arquitetura: estudo de caso da UFPE. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE ESTRUTURAS EM ESCOLAS DE ARQUITETURA, 3., 2017, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto, 2017. p. 350-368.

RHINOCEROS. **Rhinoceros**: modeling tools for designers. Version 5. Seattle: Robert McNeel & Associates, 2012. Programa de computador. 1 CD-ROM.

SANTOS, R; KAPP, S.; SILVA, A.S. Esboço de uma genealogia da representação gráfica das estruturas. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE ESTRUTURAS EM ESCOLAS DE ARQUITETURA, 3., 2017, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto, 2017. p. 996-1010.

SAP2000. **SAP2000**. Disponível em: <http://www.csiportugal.com/software/2/sap2000>. Acesso em: 15 jan. 2017.

SCAN&SOLVE. **Scan&Solve™** 2014 Plug-in for Rhino. Version 2014.6.16.0. Madison, California: Intact Solutions, 2014. Disponível em: http://www.intact-solutions.com/site2014/download_sns_frontend.php. Acesso em: 23 fev. 2014.

SCHNETZER, H. MUTTONI, A. SCHWARTZ, J. FLURY, A. Strong Structures. *In*: FLURY, A. (Ed.) **Cooperation: The Engineer and the Architect**. Basel: Birkhäuser, 2012. p. 193-207.

SCHÖN, D. **Educating the reflective practitioner**. São Francisco: Jossey-Bass, 1987.

SCHUMACHER, P. **Parametricism as Style**: Parametricist Manifesto. 2008. Disponível em: <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>. Acesso em: 10 nov. 2017.

SCHUMACHER, P.; ZHENG, L. From Typology to Topology: Social, Spatial, and Structural. **Architectural Journal**, Londres, n. 590, 2017.

SCHUMACHER, P. Tectonism in Architecture, Design and Fashion - Innovations in Digital Fabrication as Stylistic Drivers. *In*: LEACH, N.; FARAHI, B. (Ed.), **Architectural Design**, Londres, n. 250, v. 87, nov./dez. 2017.

SEKLER, E. F. Structure, Construction, Tectonics. *In*: Kepes, Gyorgy (ed.) **Structure in Art and Science**, Londres: Studio Vista, 1965.

SEMPER, G. **The four elements of architecture and other writings**. Trad. Harry Francis Malgrave and Michael Robinson. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

SILVA, A.S.; KAPP, S.; SANTOS, R.E. Modelagem e visualização na prática de cálculo estrutural. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE ESTRUTURAS EM ESCOLAS DE ARQUITETURA, 3., 2017, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto, 2017. p. 904-917.

SPIRO, R. J. *et al.* **Cognitive flexibility theory**: advanced knowledge acquisition in ill-structured domains. *In*: ANNUAL CONFERENCE OF THE COGNITIVE SCIENCE SOCIETY, 10., 1988. HILLSDALE, 10., 1988, Hillsdale. **Anais...** Hillsdale: Erlbaum, 1988. p. 375-383.

SPUYBROEK, L. The structure of vagueness. *In*: OXMAN, R; OXMAN. (Ed.) **Theories of the Digital in Architecture**. Oxon: Routledge, 2014. p. 263-276.

STEVENS, G. **O círculo privilegiado**: fundamentos sociais da distinção arquitetônica. Brasília: Editora Unb, 2003.

SUTHERLAND, I. E. **Sketchpad**: A man-machine graphical communication system. Technical Report. Number 574. September 2003. Disponível em: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/>. Acesso em: 12 jun. 2019.

TURKLE, S.; PAPERT, S. Epistemological pluralism and the revaluation of the concrete. *In*: Harel & S. Papert (Eds.), **Constructionism**: Ablex, 1991. p. 161-191

WIESER, C. Pioneer and Projection: The Misappropriation of the Engineer in Modernist Architecture. *In*: FLURY, A. (Ed.) **Cooperation**: The Engineer and the Architect. Basel: Birkhäuser, 2012. p. 33-40.

ZUMTHOR, Paul. **Performance, recepção, leitura**. Cosac Naify, 2007.