



A CONSTRUTIBILIDADE NO PROCESSO DE PROJETO PARAMÉTRICO COLABORATIVO

VERNER MAX LIGER DE MELLO MONTEIRO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGAU)

Área de concentração: Projeto, Morfologia e Conforto no ambiente construído.

Linha de pesquisa: Projeto de Arquitetura.

Nível: Doutorado



UNIVERSIDADE DE LISBOA - FACULDADE DE ARQUITETURA

Centro de Investigação em Arquitetura, Urbanismo e Design (CIAUD)

Ramo: Arquitetura

Grupo de investigação: Observatório de arquitetura, tecnologia e inovação (OBATI)

Especialidades: Desenho e Computação; Teoria e Prática de Projeto

Ciclo de estudos: 3º (Doutoramento)

A CONSTRUTIBILIDADE NO PROCESSO DE PROJETO PARAMÉTRICO COLABORATIVO

Verner Max Liger de Mello Monteiro

Orientadora UFRN:

Professora Doutora Maísa Fernandes Dutra Veloso

Orientador ULisboa:

Doutor Pedro Miguel Gomes Januário

Natal (Brasil) / Lisboa (Portugal)

Julho 2021

Verner Max Liger de Mello Monteiro

A **CONSTRUTIBILIDADE** NO PROCESSO DE **PROJETO PARAMÉTRICO COLABORATIVO**

Tese de doutorado/doutoramento apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da UFRN em cotutela com o Curso de Doutorado em Arquitetura da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, sob a orientação da Professora Doutora Máisa Fernandes Dutra Veloso (UFRN) e do Doutor Pedro Miguel Gomes Januário (ULisboa), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Arquitetura.

Natal (Brasil) / Lisboa (Portugal)
Julho 2021

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catálogo de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Dr. Marcelo Bezerra de Melo Tinôco - DARQ - -CT

Monteiro, Verner Max Liger de Mello.

A construtibilidade no processo de projeto paramétrico colaborativo / Verner Max Liger de Mello Monteiro. - 2021. 382f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Arquitetura. Natal, RN, 2021.

Orientadora UFRN: Máisa Fernandes Dutra Veloso.

Orientador ULisboa: Pedro Miguel Gomes Januário.

1. Construtibilidade - Tese. 2. Processo de projeto - Tese. 3. Projeto paramétrico - Tese. 4. Projeto colaborativo - Tese. 5. Modelagem paramétrica - Tese. I. Veloso, Máisa Fernandes Dutra. II. Januário, Pedro Miguel Gomes. III. Título.

RN/UF/BSE15

CDU 72

VERNER MAX LIGER DE MELLO MONTEIRO

A CONSTRUTIBILIDADE NO PROCESSO DE PROJETO PARAMÉTRICO COLABORATIVO

BANCA EXAMINADORA / CONSTITUIÇÃO DO JÚRI:

MEMBRO EXTERNO À UFRN (vogal) – Professora Doutora Maria Gabriela Caffarena Celani

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

MEMBRO EXTERNO À ULISBOA (vogal) – Doutora Alexandra Cláudia Rebelo Paio

Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa do Instituto Universitário de Lisboa.

MEMBRO INTERNO DA UFRN (vogal) – Professor Doutor Heitor Andrade Silva

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MEMBRO INTERNO DA ULISBOA (vogal) – Doutor Paulo Manuel dos Santos Pereira de Almeida

Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa.

ORIENTADORA NO ÂMBITO DA UFRN – Professora Doutora Maísa Fernandes Dutra Veloso

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

ORIENTADOR NO ÂMBITO DA ULISBOA – Doutor Pedro Miguel Gomes Januário

Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa.

A incorporação da modelagem paramétrica ao processo de projeto computacional tem proporcionado aos arquitetos a possibilidade de experimentar formas geométricas sem precedentes, mas também tem trazido consigo a dificuldade de materialização do edifício projetado, que comumente não é considerada nas fases iniciais da concepção. Essa dificuldade de pensar a materialidade desde o princípio pode levar à descaracterização, nas fases posteriores, do que foi concebido inicialmente pelo projetista, podendo resultar em mudanças mais drásticas também na própria construção, quando não incorre em inviabilidade construtiva. Esse contexto traz ao processo de projeto uma forte necessidade de colaboração, que integre aspectos como estrutura, materiais, fabricação e construção. Nesse cenário, surge a questão: Como a construtibilidade interfere no processo de projeto paramétrico? Como **hipótese**, defendemos que a percepção da construtibilidade, quando priorizada desde as fases iniciais por equipes colaborativas, contribui para o projeto paramétrico, fazendo com que os aspectos construtivos sejam integrados à modelagem e consequentemente facilitem a materialização do edifício. O **objeto** compreende, portanto, a relação entre a construtibilidade e o processo de projeto paramétrico. O **objetivo** geral da pesquisa consiste em analisar como as questões relativas à construtibilidade, consideradas por uma equipe colaborativa, interferem no processo de projeto paramétrico. O **método** utilizado está dividido em compreensão do problema (fase I), proposição de uma solução (fase II) e sua validação (fase III). A fase de compreensão está amparada pelas etapas dos Referenciais Teórico-conceitual e Empírico, assim como da realização de Experimentos de Projeto. A de proposição é composta pela indicação de diretrizes metodológicas para projetos paramétricos focados na construtibilidade, validada (Fase III) por um painel internacional de especialistas da área. O principal **resultado** da pesquisa indica a confirmação da hipótese nos casos analisados, atestando que a priorização da construtibilidade leva a um processo de projeto paramétrico mais sistematizado e fluido, através da incorporação de aspectos construtivos à modelagem. A pesquisa **contribui** para a área de CAAD (*Computer Aided Architectural Design*), com um estudo sobre o impacto da construtibilidade no processo de projeto de Arquitetura e com a indicação de diretrizes metodológicas para um projeto paramétrico focado na construtibilidade.

Palavras-chave: Construtibilidade, processo de projeto, projeto paramétrico, projeto colaborativo, modelagem paramétrica.

ABSTRACT

The recent introduction of parametric modeling tools to the design process has offered to architects the opportunity to experiment unprecedented geometrical shapes. But along with this freedom, comes the difficulty to get the building shape materialization, which is usually neglected in the early design stages. This difficulty of thinking the materialization since the beginning can lead to decharacterizations of the initial design in subsequent phases, causing significant changes especially during the construction phase, or making the design unfeasible to construction. This context demands, in the design process, a high integration between structure, material, fabrication and construction. This complexity requires, according to the literature, a group working collaboratively, especially combining the expertise of architects and civil engineers. This scenario drove us to the following research question: “How constructibility affects the parametric design process?”. Our **hypothesis** is that the awareness of constructability, when prioritized since the early design stages by collaborative teams, contributes to parametric design, making construction aspects more integrated to the modeling and consequently facilitates the materialization of the building. The **study object** comprises the relations between constructibility and parametric design process. This research **aims** to analyze how constructibility aspects, considered by a collaborative team, affects the parametric design process. The **research method** is based on the constructive research, divided in problem comprehension (phase I), proposition of a solution (phase II) and validation (phase III). The phase I, of comprehension, is composed by the following stages: theoretical-conceptual and empirical basis and design experiments. The phase II, of proposition, will be destined to the indication of methodological guidelines, while the phase III, will be the Validation of the methodological guidelines by experts in the field of Parametric Design. The main **result** confirmed the hypothesis in the analyzed cases, attesting that the prioritization of constructability leads to a more systematic and fluid parametric design process, through the incorporation of constructive aspects to the parametric model. We expect to contribute to the CAAD (*Computer Aided Architectural Design*) field with a discussion on how constructibility affects the parametric design process and with the proposition of methodological guidelines to a parametric design process focused on constructability.

Key-words: Constructability, design process, parametric design, collaborative design, parametric modeling.

À minha esposa, Laíze, e aos meus filhos Victor, Elise (In Memoriam) e Bernardo.

AGRADECIMENTOS

À professora Maísa Veloso, minha orientadora brasileira, pelos ensinamentos valiosos e constantes, frutos de uma longa parceria acadêmica que perdura por mais de 18 anos, iniciada nas trilhas da graduação, fortalecida no Mestrado Profissional, e consolidada no doutorado. Suas orientações sempre foram muito precisas e esclarecedoras.

Ao professor Pedro Januário, meu orientador português, por ter me recebido em Lisboa, por ter aberto as portas de sua sala de aula para que parte desta pesquisa fosse realizada, e pela constante confiança depositada nas orientações e nas difíceis decisões.

Aos arquitetos Daniele Lancia e Tomislav Dushanov, por terem fornecido informações significativas dos processos de projeto analisados nos estudos empíricos.

A todos os profissionais e estudantes que participaram dos experimentos de projeto, pela motivação e disponibilidade, para aquela que foi uma das principais etapas de coleta de dados desta tese.

Ao professor Heitor de Andrade, pela parceria na ação integrada de pesquisa, ensino e extensão, que possibilitou a realização do experimento de projeto 01, e pelas valiosas sugestões dadas nas etapas de qualificação e pré-defesa desta tese.

Ao professor e engenheiro civil Felipe Tavares, por ter aceitado vir a Natal para colaborar conosco durante a realização do experimento de projeto 01, trazendo seus valiosos conhecimentos em análise estrutural paramétrica e em processos construtivos.

Ao arquiteto meu ex-aluno Jessé Goes, pelo apoio durante a capacitação dos profissionais do experimento 01, que em muito contribuiu com a sua experiência no uso de ferramentas paramétricas.

Aos professores participantes da banca do concurso de ideias do experimento 01, por elevar o nível de discussão das propostas apresentadas pelos profissionais.

Aos professores brasileiros e portugueses especialistas em projeto paramétrico que participaram da etapa de Validação desta tese, que mesmo em momento conturbado de

aulas remotas, provocado pela pandemia da COVID-19, dedicaram seu precioso tempo e conhecimento para contribuir com essa pesquisa/investigação.

Aos professores Hugo Farias e Jorge Boueri, pela recepção em Lisboa e pelo apoio dado junto à ULisboa para a realização do convênio de cotutela doutoral.

Aos professores Aldomar Pedrini, George Dantas e Gleice Elali, pelo apoio na tramitação do convênio de cotutela doutoral no âmbito da UFRN.

Aos professores Gabriela Celani, Alexandra Paio e Paulo Almeida, pelos contributos dados nas etapas de qualificação e/ou de pré-defesa.

Aos meus colegas de turma de doutorado do PPGAU, sobretudo a Camila Resende e Luciana Alves, com quem sempre compartilhei conhecimento e angústias durante o desenvolvimento da tese.

À UFRN e ao IFRN, minhas casas laborais, pela concessão de afastamento para o desenvolvimento desta tese.

À ULisboa, por possibilitar-me a abertura de novos horizontes e experiências em uma instituição internacional de ensino e pesquisa/investigação.

E a Deus, por alinhar as condições para que tudo acontecesse no tempo certo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Guggenheim Museum Bilbao.	22
Figura 2 – Walt Disney Concert Hall.	22
Figura 3 – Diagrama metodológico da pesquisa.	27
Figura 4 – Tarefas não cíclicas.	33
Figura 5 – Comunicação entre as etapas da sequência de decisões.	33
Figura 6 – Modelo de problema de projeto.	35
Figura 7 – Posição tradicional da simulação (esq.); Síntese, modelagem/modelação e simulação integradas, sendo a última a condutora do processo de projeto. ...	38
Figura 8 – Arquiteto Frei Otto e suas experimentações com modelos físicos.	39
Figura 9 – Experimentações de Antoni Gaudí para a Sagrada Família.	40
Figura 10 – Edifício sede da Nunotani Corporation.	41
Figura 11 – Número de vezes que os termos do projeto computacional aparecem na literatura entre 1978 e 2018.	44
Figura 12 – Representação conceitual da extensão dos termos do paradigma do projeto computacional.	45
Figura 13 – As três eras do projeto arquitetônico assistido por computador.	52
Figura 14 – O projeto em arquitetura: uma situação profissional de concepção.	55
Figura 15 – Relações e conexões entre construtibilidade, edificabilidade, programa de construtibilidade, e conceitos científicos relevantes.	58
Figura 16- Definições da materialização digital.	62
Figura 17 – Sequências do processo de projeto tradicional e do Novo Estruturalismo.	64
Figura 18 – Ópera de Sydney.	65
Figura 19 – Centro Pompidou Metz.	66
Figura 20 - Esquema genérico de um processo sequencial de desenvolvimento do projeto de edifícios – participação dos agentes.	69
Figura 21 – Atores tem um entendimento compartilhado do projeto.	71
Figura 22 – Processos de projeto de acoplamento estreito e distante.	72
Figura 23 – Modelo de processo de projeto colaborativo.	74
Figura 24 – Modelo construído da Toledo Gridshell, em vista superior (esq.) e interna (dir.).	91
Figura 25 - Fluxo do processo de projeto.	94
Figura 26 – Modelo paramétrico com a aplicação de forças em três lados da Gridshell.	95
Figura 27 – Esquema da diagonal (esq.), conexão do tipo bota de jangada (centro) e torção da malha por suportes (dir.).	96
Figura 28 – Testes de momento fletor em amostra da madeira utilizada no projeto.	96
Figura 29 – Conexões estruturais das peças de madeira com parafuso.	97
Figura 30 – Montagem da Toledo Gridshell pela equipe (esq.), e equipe no topo da estrutura (dir.).	98
Figura 31 – Arena do Morro.	100
Figura 32 – Volumetria com proposta de equipamentos públicos para Mãe Luíza, ...	102
Figura 33 – Opções de estudos volumétricos potencialmente viáveis.	102

Figura 34 – Proposta de prolongamento da estrutura do ginásio existente.....	103
Figura 35 – Cobertura da Arena do Morro com definição da pequena calha.	106
Figura 36 – Tipos de cobogós distribuídos parametricamente.	107
Figura 37 – Planta de posicionamento de pilaretes e cobogós.	107
Figura 38 – Protótipo do bloco de concreto fabricado digitalmente com espuma de alta densidade.....	108
Figura 39 – Processo de desmoldagem do cobogó a partir de fôrma usinada.	109
Figura 40 – Estrutura de concreto das paredes, durante o recebimento dos blocos de concreto.	110
Figura 41 – Reforço estrutural das terças metálicas em balanço.	110
Figura 42 – Maquete do edifício em escala reduzida.	112
Figura 43 – Mock-ups de cobertura, parede e piso.....	113
Figura 44 – Morpheus Hotel.....	116
Figura 45 – Estudos volumétricos conceituais do Morpheus Hotel.....	118
Figura 46 – Regras estruturais do exoesqueleto do Morpheus Hotel.	118
Figura 47 – Racionalização do vazio central do Morpheus Hotel.	120
Figura 48 – Núcleos de circulação e serviços do Morpheus Hotel.	120
Figura 49 – Elementos de fachada planos (esq.), de curvatura simples (centro) e de forma livre facetados e duplamente curvados (dir.).....	120
Figura 50 – Elementos construtivos principais do Morpheus Hotel.	121
Figura 51 – Primeiro Mock-up de nó estrutural do Morpheus Hotel.	122
Figura 52 - Regras para a racionalização geométrica do revestimento.	122
Figura 53 - Abordagens 1 (esq.), 2 (dir.) e 3 (dir.) da relação entre revestimento e exoesqueleto estrutural.	123
Figura 54 - Mock-ups do revestimento e estrutura (esq.) e da estrutura, revestimento e cortina de vidro (dir.).	123
Figura 55 - Modelos paramétricos criados e compartilhados pela equipe ZHA com os colaboradores.	124
Figura 56 - Subestrutura de suporte das chapas de alumínio em um nó estrutural do projeto.	124
Figura 57 – Processo de fabricação do revestimento de alumínio.....	125
Figura 58 – Distribuição das equipes de projeto e construção.....	126
Figura 59 – Processo de montagem da subestrutura da chapa de alumínio da fachada do Morpheus Hotel.....	129
Figura 60 – Fabricação da chapa de alumínio em fresadora CNC.	129
Figura 61 – Corte longitudinal (esq.) e fachada frontal (dir.) do Morpheus Hotel.	130
Figura 62 – Perfil de atuação dos profissionais envolvidos no experimento 01.	138
Figura 63: a) Laboratório de Informática/DARQ/UFRN e b) Auditório da SIN/UFRN.	144
Figura 64 – Planta de implantação e volumetria da área disponível para o projeto.....	144
Figura 65 – Resultado do exercício de reprodução de barras que se interceptam.....	147
Figura 66 – Exercícios de reprodução realizados no dia 02 da etapa de capacitação.....	148
Figura 67 – simulação de comportamento estrutural de uma viga no Karamba3D.....	150
Figura 68 – Resultado do exercício de reprodução do parabolóide hiperbólico.....	151
Figura 69 – Primeiras ideias do G1-P.....	155
Figura 70 – Primeira mudança na forma do projeto do G1-P.	156

Figura 71 – aplicação da primeira mudança na forma do projeto do G1-P no <i>Grasshopper</i>	156
Figura 72 – Manipulação do projeto na plataforma BIM.	157
Figura 73 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G1-P.	158
Figura 74 – Primeiras ideias do G2-P.	159
Figura 75 – Primeira mudança na forma do projeto do G2-P.	159
Figura 76 – Teste de volumetria no modelo paramétrico pelo G2-P.	159
Figura 77 – Estudo de materialização feito pelo G2-P.	160
Figura 78 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G2-P.	162
Figura 79 – Primeiras ideias do G3-P.	163
Figura 80 – Primeira alteração de projeto do G3-P no Sketchup e <i>Grasshopper</i>	163
Figura 81 – Segunda mudança no partido.	164
Figura 82 – Mudança no partido.	164
Figura 83 – Detalhes estruturais do G3-P.	165
Figura 84 – Módulo do projeto do G3-P materializado em escala reduzida.	165
Figura 85 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G3-P.	167
Figura 86 – Definição de conceito do projeto.	168
Figura 87 – Primeiras ideias do G4-P.	169
Figura 88 – Ordenamento de geometria do G4-P.	169
Figura 89 – Ordenamento de geometria do G4-P.	169
Figura 90 – Criação do algoritmo do G4-P.	170
Figura 91 – Criação de detalhes estruturais.	172
Figura 92 – Modelo estrutural proposto.	172
Figura 93 – Análises estruturais do projeto do G4-P.	173
Figura 94 – Criação de detalhes estruturais.	174
Figura 95 – Adaptação de detalhes estruturais.	174
Figura 96 – Identificação de pouca altura nas chapas receptoras das vigas.	175
Figura 97 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G4-P.	176
Figura 98 – Primeiras ideias do projeto.	177
Figura 99 – Definição de estudos volumétricos do G5-P.	178
Figura 100 – Análises estruturais do módulo básico do projeto do G5-P.	179
Figura 101 – Criação do algoritmo do G5-P.	179
Figura 102 – Materialização de soluções durante o processo de projeto do G5-P.	180
Figura 103 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G5-P.	182
Figura 104 – Primeiras ideias do G6-P.	183
Figura 105 – Definição de encaixes estruturais do G6-P.	184
Figura 106 – Montagem do algoritmo do G6-P.	185
Figura 107 – Definição de conceito do projeto.	185
Figura 108 – Análise estrutural do projeto do G6-P.	186
Figura 109 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G6-P.	187
Figura 110 – Propostas arquitetônicas apresentadas pelos grupos.	188
Figura 111 – Painel de controle com elementos estruturais do projeto do G1-P.	195
Figura 112 – Laboratório de Prototipagem Rápida (LPR).	200
Figura 113 – Espaço 24 da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa.	201
Figura 114 – Oficina da FA/ULisboa.	201

Figura 115 – Estrutura curricular do Curso de Arquitetura da FA/ULisboa, com destaque para as áreas de projeto, representação gráfica e tecnologia.....	204
Figura 116 – Exercícios de identificação princípios geradores de geometrias a serem concebidas nas ferramentas de modelação geométrica e generativa.	206
Figura 117 – Exercícios de composição de códigos de análise urbana.	207
Figura 118 – Exercícios de criação de massa edificada e de recorte de superfície topográfica.	207
Figura 119 – Exemplo de praça de toiros em Portugal.....	208
Figura 120 – Exercício contendo os modelos territorial, urbano e do edifício.....	209
Figura 121 – Estrutura curricular do Curso de Licenciatura em Design da FA/ULisboa, com destaque para as áreas de projeto, representação gráfica e tecnologia.	212
Figura 122 – Exercício de modelação geométrica de um peixe.	212
Figura 123 – Exercício de modelação de uma cadeira genérica.	213
Figura 124 – Exercício de modelação geométrica de uma cadeira pelo estudante 01.....	214
Figura 125 – Exercício de modelação paramétrica e geração de alternativas de uma cadeira pelo estudante 01.	214
Figura 126 – Exercício de modelação geométrica de uma cadeira pelo estudante 02.....	215
Figura 127 – Exercício de modelação paramétrica e geração de alternativas de uma cadeira pelo estudante 02.	215
Figura 128 – Exercício de modelação geométrica de uma cadeira pelo estudante 03.....	216
Figura 129 – Exercício de modelação paramétrica e geração de alternativas de uma cadeira pelo estudante 03.	216
Figura 130 – Países de origem dos participantes do experimento 02.	220
Figura 131 – Área de intervenção do experimento 02.	222
Figura 132 – Vista da área de intervenção a partir da fonte central dos Jardins do Estoril.	223
Figura 133 – Capacitação em <i>Rhinoceros</i> no experimento 02.....	224
Figura 134 – Capacitação em <i>Grasshopper</i> no experimento 02.	224
Figura 135 – Quadro com agrupamento das equipas colaborativas.....	225
Figura 136 – Resumo das ações projetuais do grupo G1-E durante as quatro semanas do experimento de projeto.	228
Figura 137 – Representações finais do grupo G1-E.	230
Figura 138 - Relações espaciais entre os módulos de paletes por imbricação.....	232
Figura 139 – Resumo das principais ações projetuais do grupo G2-E durante as quatro semanas do experimento 02.	233
Figura 140 – Representações finais do grupo G2-E.	234
Figura 141 – Ações projetuais da categoria CE1 ao longo das semanas.	240
Figura 142 – Ações projetuais da categoria CP1 ao longo das semanas.	241
Figura 143 – Ações projetuais da categoria CP2 ao longo das semanas.	243
Figura 144 – Integração entre construtibilidade e parametrização.	243
Figura 145 – A racionalização geométrica nos experimentos de projeto.	244
Figura 146 – Etapas de implementação da abordagem paramétrica para o ensino de arquitetura.	248
Figura 147 – Educação em projeto paramétrico centrada no modelo.....	249
Figura 148 – Modelo de estratégias de Hudson (2010).....	250

Figura 149 – Esboço do modelo inicial de diretrizes metodológicas com ações projetuais centradas na colaboração multidisciplinar.	253
Figura 150 – Modelo inicial de diretrizes metodológicas.	260
Figura 151 – Perfil de atuação dos especialistas.....	264
Figura 152 – Quadro síntese das respostas dos especialistas ao formulário 01.	267
Figura 153 – Atuação dos especialistas por tipo arquitetônico e porte.....	269
Figura 154 –Quadro síntese das respostas dos especialistas aos formulários 01 e 02.	270
Figura 155 – Modelo de diretrizes metodológicas final.	275
Figura 156 – Sequência de definição do material, da estrutura e da forma nos processos de projeto.	280

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Categorias de análise consideradas para a tese.	89
Quadro 2 – Meios de concepção utilizados pela equipe de projeto do Toledo Gridshell.	99
Quadro 3 – Meios de concepção utilizados pela equipe de projeto do Arena do Morro.	114
Quadro 4 – Meios de concepção utilizados pela equipe de projeto do Morpheus Hotel. ..	130
Quadro 5 – Enquadramento dos estudos empíricos nas categorias de Celani e Lenz (2014).	133
Quadro 6 – Enquadramento dos estudos empíricos na hipótese lançada.	134
Quadro 7 - Agrupamento das equipes colaborativas do experimento 01.	152
Quadro 8 –Estratégias de colaboração previstas pelo G5-P.	177
Quadro 9 - classificação das equipes no concurso de ideias.	189
Quadro 10 – Atendimento aos requisitos do enunciado do exercício de concepção.	189
Quadro 11 - Confirmação da hipótese da tese para o Experimento 01.	197
Quadro 12 - Ações projetuais adotadas pelos grupos colaborativos.	239
Quadro 13 – Classificação das ações projetuais transitórias a serem aplicadas no modelo inicial de diretrizes metodológicas.	255
Quadro 14 – Códigos e nomenclaturas das ações projetuais consolidadas.	270
Quadro 15 – Painel de especialistas com respostas aos formulários 1 e 2.	271
Quadro 16 – Relação dos principais elementos e contributos para a construção do modelo de diretrizes metodológicas final.	284

LISTA DE ABREVIATÖES E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
AP	Anteprojeto
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (Modelagem de Informação da Construção)
CAAD	<i>Computer-Aided Architectural Design</i> (Projeto Arquitetônico Auxiliado por Computador)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> , (Projeto Auxiliado por Computador)
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i> , (Fabricação Auxiliada por Computador)
CEP	Comitê de Ética e Pesquisa
CIAUD	Centro de Investigação em Arquitetura, Urbanismo e <i>Design</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
COVID-19	<i>CoronaVirus Disease</i> - 2019
EP	Estudo Preliminar
FA/ULisboa	Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa
HdM	Herzog & DeMeuron
IES	Instituição de Ensino Superior
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i> (Formato interoperável da plataforma BIM)
LPV	Linguagem de Programação Visual
MGG	Modelação Geométrica e Generativa
NBR	Norma Brasileira
MP	Modelagem, ou Modelação Paramétrica
MPPDD	Modelação Paramétrica e Prototipagem Digital em <i>Design</i>
PE	Projeto Executivo
PPAPMA	Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Projeto e Meio Ambiente
PPGAU	Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo
SIPAC	Sistema Integrado de Patrimônio, Administração e Contratos
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UL	Universidade de Lisboa
ZHA	<i>Zaha Hadid Architects</i>

GLOSSÁRIO (Brasil – Portugal)

Esta tese foi desenvolvida a partir dos preceitos linguísticos do acordo gramatical da língua portuguesa. Contudo, ainda é possível detectar variações em alguns termos aplicados no Brasil e em Portugal, que podem eventualmente comprometer o entendimento dos leitores brasileiros e portugueses. Construímos um glossário simplificado Brasil – Portugal, que faz uma ligação entre significados que possam, eventualmente, proporcionar falhas de compreensão durante a leitura do texto.

BRASIL	PORTUGAL
Arquivo	Ficheiro
Canteiro de obras	Estaleiro de obras
Disciplina	Unidade Curricular
Doutorado	Doutoramento
Entender	Perceber
Fachada	Alçado
Grade curricular	Estrutura curricular
Modelagem	Modelação
Pesquisa	Investigação
Plano de Curso da Disciplina	Ficha de Unidade Curricular
Questionário	Inquérito
Recepção	Receção
Registro	Registo
Salvar arquivo	Guardar ficheiro

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
Problemática da pesquisa	20
Hipótese e Objeto de Estudo	25
Objetivos	26
Abordagem metodológica	26
Organização e estrutura da tese	30
1 REFERENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL	32
1.1 Processo de Projeto Paramétrico em Arquitetura	32
1.2 Materialidade e Construtibilidade	56
1.3 Projeto Colaborativo na era dos recursos computacionais	69
1.4 Considerações sobre o capítulo	83
2 REFERENCIAL EMPÍRICO	87
2.1 Toledo Gridshell, Nápoles (Itália)	91
2.2 Arena do Morro, Natal (Brasil)	100
2.3 Morpheus Hotel, Macau (Hong Kong, China)	115
2.4 Considerações sobre o capítulo	131
3 EXPERIMENTOS DE PROJETO	135
3.1 Experimento 01: Oficina de Projeto Paramétrico (Natal/Brasil)	136
3.1.1 Perfil dos profissionais	137
3.1.2 Metodologia da Oficina	142
3.1.3 Capacitação dos participantes	146
3.1.4 Formação e perfil das equipes colaborativas	152
3.1.5 Os processos de projeto das equipes colaborativas	153
3.1.5.1 Grupo G1-P	155
3.1.5.2 Grupo G2-P	158
3.1.5.3 Grupo G3-P	162
3.1.5.4 Grupo G4-P	167
3.1.5.5 Grupo G5-P	176
3.1.5.6 Grupo G6-P	182
3.1.6 Os produtos gerados	188
3.1.7 Análise dos resultados	190
3.2 Experimento 02: <i>Geometric and Generative Modeling</i> (Lisboa/Portugal)	198
3.2.1 Análise de Disciplinas na FA/ULisboa	199
3.2.1.1 MGG (Curso de Arquitetura)	203
3.2.1.2 MPPDD (Curso de Design)	210
3.2.1.3 Considerações sobre a análise de disciplinas	217

3.2.2	Perfil dos estudantes do experimento 02.....	220
3.2.3	Metodologia da disciplina do experimento 02	221
3.2.4	Capacitação dos estudantes do experimento 02.....	223
3.2.5	Formação e perfil das equipes colaborativas do experimento 02	225
3.2.6	Os processos de projeto das equipes colaborativas	226
3.2.6.1	Grupo G1-E.....	227
3.2.6.2	Grupo G2-E.....	230
3.2.7	Análise dos resultados.....	234
3.3	Considerações sobre o capítulo	237
4	DIRETRIZES METODOLÓGICAS.....	246
4.1	Diretrizes metodológicas precedentes.....	247
4.2	Modelo inicial de diretrizes metodológicas	250
4.3	Validação do modelo (Método Delphi)	261
4.3.1	Método de Validação.....	261
4.3.2	Seleção dos especialistas.....	263
4.3.3	Processo de Validação.....	266
4.4	Modelo de diretrizes metodológicas final	273
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	277
	Síntese dos resultados	277
	Conclusões	284
	Limitações e desafios para trabalhos futuros.....	290
	REFERÊNCIAS.....	294
	APÊNDICES	304
	Apêndice A – Formulário eletrônico aplicado no referencial empírico	305
	Apêndice B – Lista de materiais SIPAC-UFRN utilizadas no experimento 01	312
	Apêndice C – Roteiro de entrevista aplicada com profissionais do experimento 01	315
	Apêndice D – Resumo das ações projetuais - experimento 01	316
	Apêndice E – Enunciado de concepção projetual do experimento 02	323
	Apêndice F – Formulário eletrônico - experimento 02.....	324
	Apêndice G – Formulário eletrônico I – Validação	331
	Apêndice H – Formulário eletrônico II – Validação.....	338
	Apêndice I – Códigos desenvolvidos pelas equipes no <i>Grasshopper</i>	341
	ANEXOS.....	342
	Anexo I – Parecer Consubstanciado do CEP.....	343
	Anexo II – Ficha de unidade curricular da disciplina MGG	348
	Anexo III – Ficha de unidade curricular da disciplina MPPDD	355
	Anexo IV – Artigo publicado no evento eCAADe Berlin 2020.....	362
	Anexo V – Capítulo publicado no livro PHI – <i>Tradition and Innovation</i>	373
	Anexo VI – Artigo publicado no periódico on-line Arquitectos.....	382

INTRODUÇÃO

Esta tese de doutorado/doutoramento foi desenvolvida no âmbito do convênio acadêmico internacional celebrado em 23 de novembro de 2018 entre a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Brasil) e a Universidade de Lisboa (Portugal), visando a cooperação acadêmica, para fins de elaboração de teses de doutoramento em regime de cotutela com vista à dupla titulação na obtenção do grau de Doutor.

Este documento segue os termos constantes no convênio e condensa exigências das universidades brasileira e portuguesa. As regras de apresentação do conteúdo e a formatação do documento estão de acordo com os preceitos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - (nomeadamente as normas NBR 14724/2011 - Apresentação de Trabalhos Acadêmicos e a NBR 6023/2016 - Informação e documentação — Referências — Elaboração), segundo instrução vigente no programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e do Programa de Doutorado em Arquitetura da Universidade de Lisboa. Todos os textos extraídos de fontes de língua inglesa citados neste documento foram objeto de tradução livre pelo autor.

Nesta introdução, serão apresentadas a problemática da pesquisa, a hipótese, os objetivos, a abordagem metodológica e organização dos capítulos seguintes da tese.

Problemática da pesquisa

Com o advento da modelagem paramétrica, na qual os algoritmos geram formas, os arquitetos passaram a ter a possibilidade de experimentar uma liberdade de padronização geométrica sem precedentes, “abrindo novas possibilidades para a criação de superfícies não uniformes e não monótonas” (KOLAREVIC e KLINGER, 2008, p.19). Os sistemas paramétricos e as ferramentas computacionais foram apontados por Peters e Peters (2013, p. 10) como impulsionadores da concretização de projetos que antes eram inconcebíveis. Mas junto com a liberdade criativa, veio a dificuldade de materialização dessas geometrias complexas.

A preocupação com a materialização na era digital foi trazida à discussão por autores como Picon (2004, p.114), quando afirmou que o desenvolvimento do projeto digital é frequentemente apresentado como desafiador de aspectos concretos e das tecnologias construtivas. Segundo ele, os “projetos baseados em computador comumente parecem negligenciar a dimensão material da arquitetura, e a sua relação com propriedades como peso, elasticidade e resistência” (*Op. cit.*, p.114). O motivo, segundo o autor, é que na tela do computador, “formas parecem flutuar livremente, sem restrições além daquelas existentes na ferramenta computacional e na imaginação do projetista”.

O conhecido termo *blob*, que “refere-se à arquitetura curvilínea e biomórfica” (SYKES, 2010, s.n) é, segundo a autora, “tipicamente ligado a projetos computacionais e à exploração de sistemas numéricos complexos”. O projeto paramétrico foi, por algum tempo, associado à arquitetura *blob*, representada por edifícios de difícil (ou impossível) materialização.

Mas a problemática da materialização de formas arquitetônicas complexas não surge com o projeto computacional. O arquiteto espanhol Antoni Gaudí foi um dos pioneiros na adoção da racionalização da forma de superfícies complexas na busca por sua materialização (AUSTERN; CAPELUTO; GROBMAN, 2018, p.281). Além dele, os arquitetos Victor Horta e Hendrik Petrus Berlage foram impulsionados à criação de formas arquitetônicas totalmente novas (FRAMPTON, 1997, p.69). À sua época, foi necessário que estivessem presentes no canteiro/estaleiro de obras para garantir que a materialização das formas complexas ocorresse conforme o planejado, dada a peculiaridade e singularidade dos seus projetos. Pode-se afirmar que a integração do arquiteto com a obra foi essencial para a execução do edifício.

No contexto do projeto digital, Iwamoto (2010, p.4) sinaliza que o meio digital e as tecnologias emergentes estão expandindo rapidamente o que entendemos ser formalmente, espacialmente e materialmente possível. No âmbito do projeto digital, ferramentas computacionais são aplicadas ao longo do processo de projeto para concepção e execução de formas arquitetônicas, e quando associadas a ferramentas analógicas, “frequentemente influem de maneira significativa tanto no processo quanto no resultado final” (KÓS, 2016, p.160).

Exemplos emblemáticos dessa nova maneira de projetar e materializar a forma são o museu Guggenheim de Bilbao (Figura 1) e o Walt Disney *Concert Hall* (Figura 2), do arquiteto americano Frank Gehry, que estão entre as obras estudadas por Shelden (2002) em sua tese de doutoramento, que pesquisou a representação da superfície digital e a construtibilidade da arquitetura de Gehry.

Figura 1 – Guggenheim Museum Bilbao.



Fonte: Bilbao (2021).

Figura 2 – Walt Disney Concert Hall.



Fonte: Acervo do autor.

Esse e outros casos demonstram que “a forma arquitetônica necessita nascer concomitantemente a uma proposta de estrutura para que não haja risco de inexequibilidade, especialmente quando a forma define a própria arquitetura” (CORDEIRO; ROCHA, 2017, p.20). Para Araújo (2017, s.n), conhecer o comportamento estrutural é tão fundamental, que é quase impossível postergar a sua existência a um estágio subsequente. Nos processos de projeto que visam os aspectos produtivos e de fabricação, ele defende que o entendimento estrutural passa a ser um desafio constante.

Em exemplo prático da integração entre estrutura e projeto paramétrico desde a concepção, os autores (SHEPHERD *et al*, 2011, p.175) do projeto do Aviva Stadium relatam que “os benefícios da abordagem paramétrica e modelagem/modelação estrutural puderam ser vistos por meio da integração com o *software* de análise estrutural”. Segundo eles, sem a inclusão da análise estrutural no modelo paramétrico, o projeto teria sido menos otimizado e eficiente (*Op. cit.*, p.175).

Projetar formas que fogem à tradicionalidade, seja com ou sem auxílio de computador, exige ir além da criação de geometrias complexas nas fases conceituais: a **construtibilidade** do edifício deve ser introduzida ao processo de projeto. Ela acontece quando, segundo Mendelsohn (1997, p.17), três campos de conhecimento se integram: **construção, planejamento e projeto**.

A partir da necessidade crescente da materialização de arquitetura não padronizada das duas últimas décadas, empresas especializadas em materialização ofertam consultoria em projeto e em processos de fabricação para viabilizar a construção desses edifícios. A inserção dessas empresas ocorrem, de acordo com alguns relatos, em fases distintas do processo de projeto (KOLAREVIC e KLINGER, 2008). Enquanto algumas se inserem desde as fases iniciais, outras entram no nicho de converter protótipos de projeto de escala reduzida em edifícios de escala 1:1.

Com esse fenômeno de mercado, os escritórios de arquitetura que se dedicam à concepção de edifícios de forma complexa precisam incluir especialistas durante o processo de projeto – sejam eles membros internos do próprio escritório, contratados como consultores ou membros de empresas especializadas em fabricação – que façam a ponte entre o processo criativo e a fabricação dos elementos do edifício (CELANI; LENZ, 2014, pp.

139–150). Contudo, é necessário que esses especialistas sejam integrados desde as fases iniciais do projeto, como defendem Oxman e Oxman (2010), em seu manifesto do novo estruturalismo. Eles definem que estrutura, programação computacional e fabricação de sistemas materiais se tornaram uma área de estudo comum a arquitetos e engenheiros calculistas. Segundo os autores, os processos de projeto devem retornar às suas fontes materiais, o que remete a pensar, de forma colaborativa¹, a construtibilidade desde as fases iniciais de concepção do projeto. Essa abordagem integrada e colaborativa confronta modos tradicionais da prática arquitetônica no que diz respeito à troca irrestrita de informações (KOLAREVIC e KLINGER, 2008, p.6), em que o arquiteto planeja isoladamente seu projeto longe do canteiro/estaleiro de obras.

Se a realidade da prática profissional arquitetônica enfrenta dificuldade em materializar projetos paramétricos, no campo da academia, as pesquisas em projeto paramétrico avançam continuamente, mas ainda estão predominantemente dirigidas ao estudo da forma na fase de projeto. Os fatores que podem explicar isso são a limitação orçamentária e o arcabouço de trabalho de pesquisadores, por essa razão, os estudos que relacionam o projeto paramétrico e a construtibilidade ainda são promissores, especialmente os que consideram a integração entre projeto e construtibilidade desde as fases iniciais e em ambiente colaborativo.

A partir da contextualização desse problema de pesquisa, uma questão-central é lançada: **Como é que a construtibilidade interfere no processo de projeto paramétrico colaborativo?** Ela restringe ou facilita o processo de projeto da equipe? Os projetistas criam formas mais restritas em função dos materiais e técnicas construtivas aplicadas? Ou, ao contrário, a construtibilidade traz mais segurança para a materialização do objeto arquitetônico?

¹ Por meio de um projeto colaborativo assistido por computador, que ocorre quando há interação entre sistemas e participantes. A efetividade da colaboração depende da realização de algo por um grupo que não poderia ser realizado por um indivíduo Kvan (2000).

Hipótese e Objeto de Estudo

Como ponto de partida, pressupõe-se que a concepção arquitetônica está intimamente ligada ao conhecimento de aspectos construtivos e à sua estrutura (CORDEIRO e ROCHA, 2017, p.20; PIÑÓN, 1998, p.92), e que o projeto colaborativo, entre arquitetos, engenheiros e fabricantes², como anunciado por Oxman e Oxman (2010, p.17), facilita a resolução de problemas relativos à materialização do objeto arquitetônico desde as fases iniciais de sua concepção.

Segundo Schön (2000, p. 61), os projetistas podem diferir nas prioridades que escolhem para projetar em diversos estágios do processo, mas quando ocorre uma situação de complexidade ou incerteza, é necessária a imposição de uma ordem qualquer. De modo similar, Lawson (2011, pp.103-104) indica que determinadas restrições projetuais podem ser escolhidas pelos projetistas para se tornarem a base essencial do projeto, e são chamadas de radicais, isto é, quando “tratam do propósito primário do objeto ou sistema a ser projetado” (*Ibidem*, p.103).

A consideração desses pressupostos nos direciona à hipótese que **a percepção da construtibilidade³, quando priorizada desde as fases iniciais por equipes colaborativas, contribui para o projeto paramétrico, fazendo com que os aspectos construtivos sejam integrados à modelagem e consequentemente facilitem a materialização⁴ do edifício.**

A hipótese foi construída a partir de três fundamentos básicos. O primeiro, quando anunciamos que o projetista elege os aspectos que deseja priorizar durante o seu processo de projeto, como apontam Lawson (2011, pp.103-104) e Schön (2000, p.61); o segundo, ao afirmar que a concepção está relacionada à consciência construtiva (PIÑÓN, 1998, p. 92); e,

² Profissional e/ou empresa especializados na fabricação digital de partes ou na construção de todo o edifício.

³ Métodos e das condições necessárias para promover a construção do edifício (conceito desenvolvido no item 1.2 Materialidade e Construtibilidade).

⁴ Produção de espaços físicos (VIANA e RHEINGANTZ, 2012); processo de construção do edifício (BERNSTEIN, 2008; KOLAREVIC e KLINGER, 2008; MANGELSDORF, 2010).

por fim, a importância da integração de equipes colaborativas desde as fases iniciais no processo de projeto paramétrico (OXMAN e OXMAN, 2010, p. 17).

O **objeto de estudo** desta tese trata, portanto, da relação entre a construtibilidade e o processo de projeto paramétrico.

Objetivos

Para checar a consistência da hipótese lançada, tem-se como objetivo principal **analisar como as questões relativas à construtibilidade, consideradas por uma equipe colaborativa, interferem no processo de projeto paramétrico**. A partir do objetivo principal, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisar o impacto da adoção de restrições construtivas e de fabricação, de cada material, nas fases iniciais do processo de projeto paramétrico;
- Analisar a contribuição de equipes colaborativas de arquitetos, engenheiros calculistas e construtores/fabricadores para uma melhor inserção da construtibilidade no processo de projeto paramétrico;
- Avaliar como as restrições construtivas se integram à modelagem paramétrica durante a projeção;
- Sintetizar diretrizes metodológicas para projetos paramétricos focados na construtibilidade;

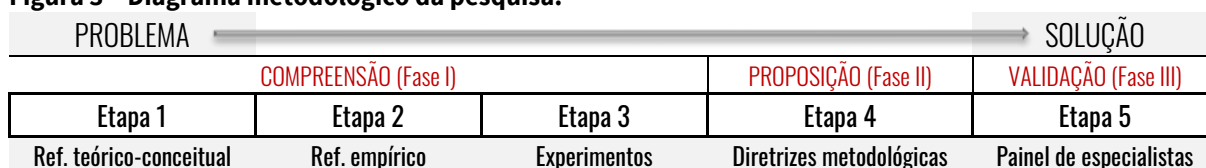
Abordagem metodológica

Os procedimentos metodológicos da tese estão agrupados em três fases, distribuídas em seis etapas de pesquisa, que parte do problema para a solução com a seguinte sequência: compreensão do problema (Fase I), proposição de uma solução (Fase II) e validação de sua eficácia (Fase III) (Figura 3).

A sua estrutura baseia-se na pesquisa construtivista (KASANEN, LUKKA e SIITONEN, 1993, pp.252-257), que parte do problema para a solução com a seguinte sequência:

compreensão do problema (Fase I), **proposição** de uma solução (Fase II) e **validação** de sua eficácia (Fase III).

Figura 3 – Diagrama metodológico da pesquisa.



Fonte: baseado nos elementos da pesquisa construtivista de Kasanen; Lukka; Siitonen (1993, pp.252-257).

Estão incluídas no diagrama proposto, enquanto requisitos para o desenvolvimento de um doutoramento em Portugal, as atividades de **pesquisa** (etapas 1 a 3), **análise** (etapas 2 e 3), **avaliação** (etapa 4) e **síntese** (etapas 4 e 5).

Neste capítulo inicial apresenta-se um resumo da abordagem metodológica geral da tese. A metodologia detalhada que foi adotada em cada uma das etapas será descrita nos capítulos posteriores.

A fase I, de compreensão, é composta pelas seguintes etapas:

- **Referencial Teórico-conceitual (etapa 1)**, que procura construir uma base teórica e conceitual, desenvolvida a partir da revisão crítica da literatura, acerca de três tópicos importantes para a pesquisa: Processos de Projeto Paramétrico em Arquitetura; Materialidade e Construtibilidade; e Projeto Colaborativo na era dos recursos computacionais. Por fim, foram estabelecidas as conexões entre os três tópicos desenvolvidos.

- **Referencial Empírico/análise de processos de projeto (etapa 2)**, em que foram estudados três processos de projetos de referência descritos por arquitetos em seus discursos, dados obtidos em publicações e por meio de formulários eletrônicos aplicados (Apêndice A). O principal critério de escolha dos casos analisados abrangeu projetos de edifícios construídos, desenvolvidos com ferramentas de modelagem paramétrica. Foram selecionados projetos que aplicaram madeira, concreto e metal, que são os materiais mais comumente empregados na indústria da construção civil. As análises desses processos de projeto foram essencialmente qualitativas com base em indicações da literatura especializada, práticas e problemas recorrentes. Os projetos escolhidos foram desenvolvidos predominantemente com o *software Rhinoceros*, onde foram aplicadas a

programação por *script* ou por Linguagem de Programação Visual (LPV) com o *plug-in Grasshopper*. Estas ferramentas foram escolhidas por serem as mais difundidas entre os projetistas que desenvolvem projetos paramétricos.

- **Experimento de projeto 01 (etapa 3a):** oferta de uma ação integrada de ensino, pesquisa e extensão denominada Oficina de Projeto Paramétrico, em que foram desenvolvidos projetos a partir de uma situação real. O experimento teve quatro semanas de duração e foi ofertado no semestre 2019.1 pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Projeto e Meio Ambiente, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPAPMA/UFRN).

O experimento de projeto 01 contou, em sua maioria, com a participação de arquitetos praticantes (pós-graduandos cursando o Mestrado Profissional). Registrou a presença também de arquitetos doutorandos e engenheiros civis praticantes. Foi uma experiência que possibilitou o engajamento de equipes no âmbito profissional.

A composição das variáveis testadas nesses experimentos teve relação com a hipótese lançada para a tese.

- **Experimento de projeto 02 (etapa 3b):** oferta de uma disciplina intitulada Modelação Geométrica e Generativa (MGG), em que foram realizados projetos a partir de uma demanda hipotética. Este experimento teve quatro semanas de duração, sendo a disciplina ofertada no segundo semestre de 2019-2020 pela Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa (FA/ULisboa). As condições do experimento foram similares às do experimento de projeto 01.

O *software* e o *plug-in* utilizados nos experimentos de projeto 01 e 02 foram, respectivamente, o *Rhinoceros* e o *Grasshopper*, tanto pela vasta utilização dessas aplicações no mercado, quanto pela possibilidade de integração direta com o *Add-on Karamba3D*, que veio a ser a interface mais viável para os engenheiros civis calculistas que compuseram as equipes colaborativas. Ressaltamos que esta tese não se aprofundou na temática do *Building Information Modeling* (BIM), por considerar que:

→ As equipes colaborativas que desenvolveram os projetos do referencial empírico (etapa 2) não utilizaram a plataforma;

- Os experimentos de projeto (etapa 3) referem-se a objetos arquitetônicos de pequena escala, que não precisaram extrair quantitativos, orçamentação; nem exigiu a execução de projetos de instalações prediais (como esgoto, água, drenagem e elétrica);
- Envolveria a adição de mais *softwares* integrados às plataformas paramétricas, o que exigiria mais tempo no treinamento dos profissionais participantes dos experimentos de projeto (etapa 3);
- Exigiria um esforço adicional na capacitação dos profissionais e estudantes, podendo tirar o foco da concepção projetual, gerando assim desmotivação e evasão durante a participação nos experimentos de projeto.

O contato com a Universidade de Lisboa por um ano (período exigido pelo convênio de dupla titulação) também facilitou o contato com arquitetos de escritórios de arquitetura europeus, nomeadamente na Itália e Suíça. Não foram buscadas referências empíricas em Portugal devido a contatos previamente estabelecidos com os escritórios italiano e suíço.

As etapas 2 e 3, até aqui descritas, complementaram-se metodologicamente. A etapa 2 não teve qualquer interferência do pesquisador durante o processo, mas pode trazer distorções, pois o projetista pode transmitir no seu discurso as informações que desejar, já que se trata de um relato pós-processo de projeto; a etapa 3 trouxe a possibilidade da observação direta, mas carrega consigo as desvantagens de o pesquisador ter participado da capacitação e os arquitetos serem recém-capacitados na ferramenta aplicada.

Por envolverem a aplicação de entrevistas e a coleta de imagens de pessoas, as etapas 2 e 3 exigiria a aprovação do projeto de pesquisa no Conselho de Ética e Pesquisa (CEP), conforme parecer consubstanciado emitido pelo referido conselho (Anexo I).

A fase II, de proposição, é composta pela síntese das informações da etapa anterior, culminando na criação de um modelo inicial **de diretrizes metodológicas (etapa 4)**, que podem ser aplicadas a processos de projeto que considerem a construtibilidade desde as fases iniciais. A elaboração do modelo inicial foi possível em razão das lições aprendidas nas etapas anteriores, que juntamente com as etapas de qualificação e do exame de pré-defesa da tese, serviram de validação prévia para atestar sua confiabilidade.

A **fase III**, consolida a **validação** do modelo inicial de diretrizes metodológicas através da aplicação de um **painel de especialistas (etapa 5)**. Este modelo foi submetido a especialistas na área, com doutorado e atuação predominante no Ensino/Pesquisa e prática profissional. Foi aplicado o Método Delphi, devidamente detalhado no capítulo de Validação, que levou a reformulações e melhorias no modelo de diretrizes metodológicas inicialmente proposto.

No fim do trabalho, é desencadeada uma discussão acerca da construtibilidade no processo de projeto paramétrico, à luz da hipótese de pesquisa, debatendo criticamente os resultados obtidos ao longo das etapas anteriores, tirando conclusões e elencando direções possíveis para futuras pesquisas.

Organização e estrutura da tese

O documento está estruturado em seis capítulos, que foram constituídos a partir da proposta metodológica lançada durante a etapa de qualificação do projeto de tese.

O capítulo 1 é o referencial teórico-conceitual, que está dividido em três tópicos de relevância para a etapa de compreensão: processo de projeto paramétrico em arquitetura; materialidade e construtibilidade; e projeto colaborativo na era dos recursos computacionais. O capítulo encerra-se com um tópico de considerações, com apontamentos gerais acerca dos três tópicos desenvolvidos.

No capítulo 2 tem-se o desenvolvimento do referencial empírico, que conta com a análise de três processos de projeto: a Arena do Morro, o Toledo Gridshell e o Morpheus Hotel e se encerra com um tópico de considerações, quando são apontadas as principais conclusões tiradas desta etapa.

O capítulo 3 trata dos experimentos de projeto, divididos em experimentos 01, 02, e considerações sobre o capítulo, cada um desenvolvido em um tópico à parte. É o capítulo mais denso da tese, quando foram coletados mais dados, proporcionando mais análises.

No capítulo 4, de diretrizes metodológicas, discorre-se sobre modelos já desenvolvidos na literatura, propõe-se o modelo inicial de diretrizes metodológicas para

projetos paramétricos focados na construtibilidade, sua validação e, por fim, o modelo final.

Nas considerações finais, são apresentados os resultados compilados de todos os capítulos, seguidos das conclusões, e a tese finaliza indicando as limitações e desafios para trabalhos futuros.

1 REFERENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL

Este capítulo está incluído na fase de compreensão, e servirá para trazer teorias e conceitos das principais temáticas abordadas por esta tese. Essa fundamentação será importante também para embasar a discussão final da pesquisa, que tratará do estudo sobre o impacto da construtibilidade no processo de projeto de arquitetura. Está dividido em três partes: a primeira trata da temática do processo de projeto paramétrico em arquitetura, explorando as especificidades de processos de projeto que utilizam o meio computacional, culminando com o uso da abordagem paramétrica na arquitetura. A segunda discorre sobre materialidade e construtibilidade em arquitetura, relacionando teorias e conceitos próprios que envolvem essa díade em contextos de projetos computacionais. Por último, pretende-se apresentar a base teórica e conceitual acerca dos projetos colaborativos da era digital.

1.1 Processo de Projeto Paramétrico em Arquitetura

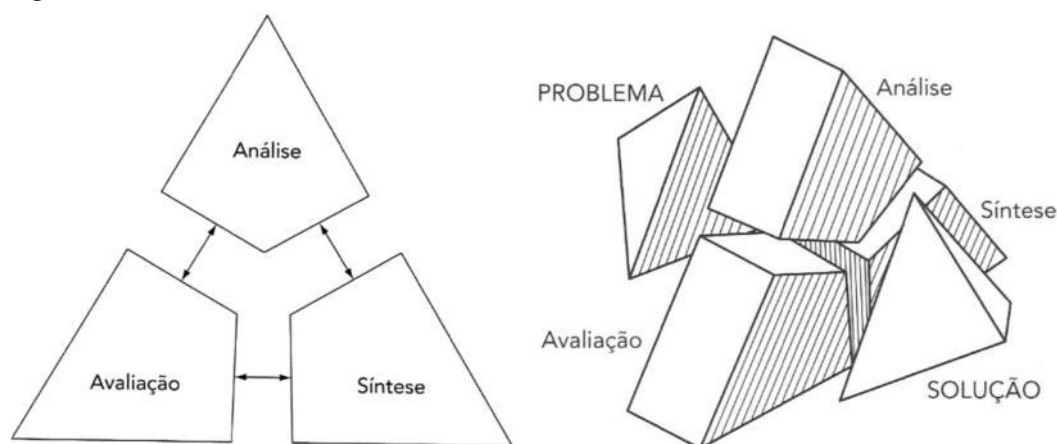
Lawson (2011, p.45) aponta que antes do surgimento do projeto, um problema é posto, e para esse problema deve ser desenvolvida uma solução. O caminho percorrido entre o problema e a solução, no entanto, exige que os projetistas transitem por três tarefas básicas: análise, síntese e avaliação. O autor aponta que a análise envolve a investigação das relações na busca de algum padrão nas informações disponíveis e a classificação dos objetivos. Ela é, portanto, o ordenamento e a estruturação do problema. A síntese, por sua vez, caracteriza-se pela tentativa de avançar e criar uma resposta ao problema – a geração de soluções. A avaliação “envolve a crítica das soluções sugeridas em relação aos objetivos identificados nas fases de análise” (*Op. cit.*, p.45).

De maneira similar, Kalay (2004, p.10) pontua que os processos de projeto tem o propósito de interligar, por meio da comunicação, os três principais componentes do processo: análise do problema, pelo qual os objetivos projetuais e restrições podem ser

desenvolvidos; a síntese das soluções projetuais; e a sua avaliação em face dos objetivos e restrições (KALAY, 2004, p.25). O autor propõe, ainda, que a exploração do problema seja guiada pelas seguintes etapas: coleta de informações, argumentação (entre os participantes), estruturação, objetivos e restrições, análise de viabilidade e planejamento.

O processo de projeto não obedece a uma lógica identificável, nem a uma ordem previsível. Essa constatação de Lawson (2011, p.55) o fez propor uma representação gráfica para demonstrar o que até então já era senso comum na literatura relacionada aos atos de projetar. A análise, síntese e avaliação, no entanto, eram apontadas anteriormente por diversos autores como tarefas ordenadas. As pesquisas do autor, no entanto, mostraram o contrário: o que existia era uma ordem não cíclica durante o processo de projeto, fazendo os projetistas navegarem indiscriminadamente por todas elas, à medida em que necessitassem (Figura 4).

Figura 4 – Tarefas não cíclicas.



Fonte: Lawson (2011, p. 47–55)

O sucesso da articulação da sequência de decisões depende da qualidade da comunicação (Figura 5) entre essas fases (ANDRADE; RUSCHEL; MOREIRA, 2011, p.91), que estão entre o problema lançado e a solução de projeto adotada.

Figura 5 – Comunicação entre as etapas da sequência de decisões.



Fonte: ANDRADE, RUSCHEL e MOREIRA, 2011, p.91.

A comunicação proposta pelos autores “é o elo entre as fases do ciclo de decisões projetual, que serve como meio restrito e estimula o processo de projeto. Entre outros instrumentos, utiliza a representação, expressa por desenhos, perspectivas, modelos, especificações e anotações” (ANDRADE; RUSCHEL; MOREIRA, 2011, p.91).

Considerando que a tarefa de análise tem natureza investigativa, é comum que as informações postas passem por processos de simplificação, como defendem os autores. Para reduzir incoerências e incompletudes do processo arquitetônico, “há duas técnicas muito usadas por projetistas de arquitetura: reduzir o número de requisitos para um nível aceitável e sobrepor os princípios de ordenação de projeto” (ANDRADE; RUSCHEL; MOREIRA, 2011, p.80).

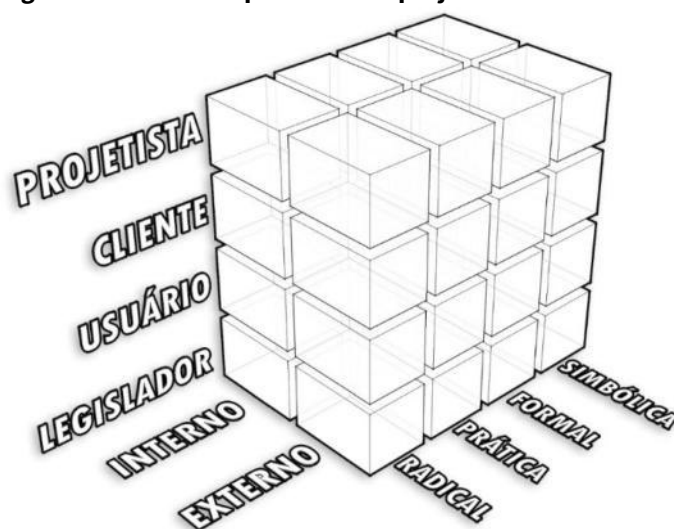
Antes de tentar resolver o problema de projeto, é preciso, segundo o autor, realizar uma formulação apropriada dos problemas de projeto. Lawson (2011, p.106) então propõe que esses problemas sejam agrupados em um modelo tridimensional onde é possível cruzar informações como os atores envolvidos, a natureza e a origem deles. Isso possibilita a identificação pontual de cada restrição presente no processo de projeto (Figura 6). Tais problemas são enquadrados como restrições que, combinadas, mostram de que direção os problemas de projeto podem partir, em cada situação específica.

Essas restrições podem ser guiadas pelos agentes envolvidos no processo (projetista, cliente, usuário e legislador), podendo ter natureza simbólica, formal, prática ou radical. Cada uma dessas possibilidades pode ser interna ou externa, quando oferece maior ou menor liberdade. Para Lawson (2011, p.98), “as restrições internas permitem um grau maior de liberdade e escolha, já que só influenciam fatores sob o controle do projetista, enquanto as restrições externas são aquelas invariáveis que, quando postas, não podem ser alteradas”.

Lawson (2011, p.103) define as restrições radicais como as que “tratam do propósito primário do objeto ou sistema a ser projetado”. O radical significa, neste caso, fundamental. As restrições práticas, por sua vez, estão relacionadas aos aspectos da realidade de fazer, produzir ou construir o projeto. Ainda é chamado pelo autor de problema tecnológico. As questões de natureza funcional também estão enquadradas aqui. As restrições formais são

as que têm a ver com a organização visual do objeto, podendo incluir regras de proporção, formato, cor e textura. Por fim, as restrições simbólicas dizem respeito às propriedades simbólicas do projeto. É pertinente destacar que as restrições radicais não possuem uma natureza específica, como as outras três. Na realidade, ela abre um espaço onde uma das outras três restrições, há pouco mencionadas, pode se enquadrar, sendo fortalecida como a restrição fundamental do projeto.

Figura 6 – Modelo de problema de projeto.



Fonte: Adaptado de Lawson (2011, p.106).

Na projeção de edifícios de forma complexa, por exemplo, a restrição formal parece ser das mais significantes. Nesses casos, as restrições construtivas (enquadradas como práticas pelo autor do modelo), porém, podem ganhar forte significado no processo. Nesse sentido, Fabricio e Melhado (2011, p.57) destacam que “o projeto de edifícios é, entre outras definições, um processo cognitivo orientado à concepção de objetos e à formulação de soluções, de forma a antecipar um produto e sua obra”. Ela é o produto do projeto que, segundo Boudon *et al.* (2000), trata da materialização de uma ideia, de um trabalho intelectual consciente ocorrido durante sua concepção. O projeto, nesse contexto, é visto como um processo de elaboração que antecede o edifício construído e não somente como um produto apresentado por um conjunto de representações gráficas.

Schön (2000, p.36) defende que o ato de projetar se dá mais efetivamente quando ocorre a reflexão-na-ação, especialmente quando o projetista conversa com as representações do projeto, e sua ideia evolui. Quando o processo envolve a conversa do

projetista com o computador, notadamente quando a geometria se torna irregular, é provável que exija uma escolha de uma diversidade de ferramentas, como desenhos, palavras e modelos computacionais (LAWSON, 2011, p.271).

No contexto dos recursos digitais, a digitalização do projeto pode muito bem aparecer como mero avanço tecnológico, uma potência suplementar oferecida ao projetista, que não afeta a natureza de sua produção. A digitalização vai além disso: permite ao arquiteto, principalmente, manipular formas extremamente complexas e visualizar mais livremente as modificações do projeto (PICON, 2010, s.n). Nesse sentido, Sykes (2010, s.n) atesta que avanços tecnológicos recentes tem trazido uma gama de oportunidades e desafios, com implicações para todos os aspectos da disciplina arquitetônica. A autora constata que:

“...a expansão do domínio digital tem criado um conjunto de possibilidades para arquitetura, com o aparecimento de novos modos de projetar (incluindo aplicações computacionais), fabricar (geração de materiais construídos com customização) e representar (criando modelos computacionais e animações)” (SYKES, 2010, s.n).

Para aqueles que “estão fora da profissão, o mais óbvio da manifestação das tecnologias digitais tem sido visível nas qualidades formais sem precedentes de certos edifícios contemporâneos” (SYKES, 2010, s.n).

É importante destacar que segundo Picon (2020, p.12), o advento das ferramentas digitais “não comprometeu a materialidade da arquitetura, como muitos teóricos e praticantes outrora temiam”. Ao contrário. Com o passar do tempo, “o reino digital ajudou a revelar as transformações que afetam nosso momento contemporâneo”, e consequentemente, “as ferramentas e tecnologias que outrora auxiliaram o processo de projeto têm começado, recentemente, a alterar a maneira a qual os arquitetos trabalham” (OSTWALD, 2012, p.2).

Gramazio e Kohler (2008a, p.117), acreditam que as tecnologias digitais não contradizem o processo de projeto arquitetônico. Segundo eles, “caso haja o entendimento de sua natureza, e sejam utilizados como ferramentas complementares à intuição e inteligência, a tecnologia digital irá liberar o potencial sistemático, estético e poético da arquitetura”.

Com efeito, a era digital veio modificar a relação entre projeto e realidade do produto arquitetônico. Ela está “progredindo da representação para a simulação, e essa mudança tem profundas implicações para a arquitetura” (SCHEER, 2014, p.9). Aqui, simular entra no contexto de simulação da construção em ambientes computacionais ou físicos. O autor advoga que as representações envolvem muita ambiguidade, e podem motivar o questionamento entre uma determinada representação e a realidade, normalmente levando o projetista a criar novas representações (*Op. cit.*, p.26). Peters e Peters (2013, p.16) argumentam que a Arquitetura pode ser pensada com o desenho, mas que também deveria ser pensada enquanto simulação, em pensamento semelhante ao de Scheer (2014, p.19).

“Muitos projetistas e pesquisadores vislumbram grandes oportunidades nessa mudança de paradigma projetual”, o que sugere um “alto potencial para guiar projetistas a tomadas de decisões mais informadas” (GU; OSTWALD, 2012, p.415).

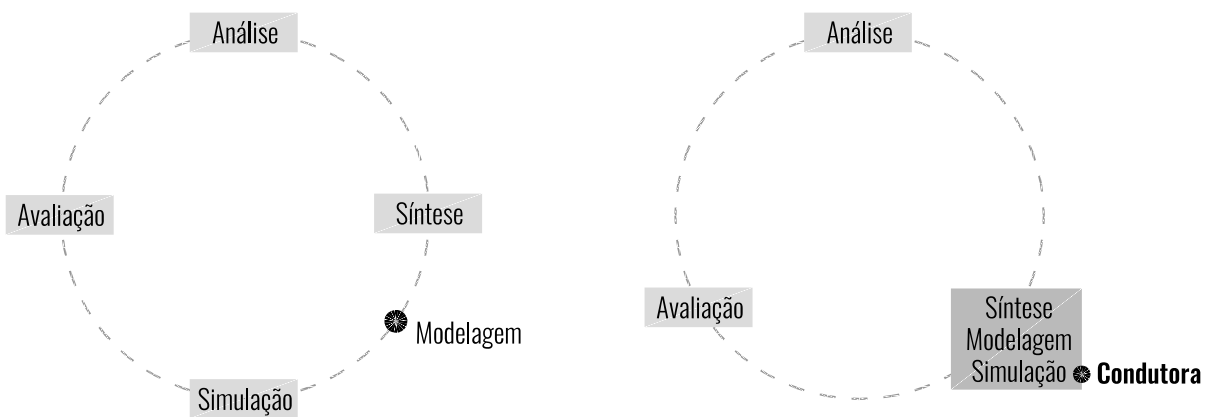
Com a emergência de diferentes tecnologias, “a relação tradicional entre os sistemas que definem o processo de projeto têm-se alterado de maneira irrevogável” (GU; OSTWALD, 2012, p.415). Para Scheer (2014, p.10), desde o momento histórico em que ocorreu a separação entre o projeto e a construção, o desenho (ou representação) vem sendo substituído pela simulação. Na classificação dada pelo autor, a simulação arquitetônica comporta-se como o edifício: ela dá os mesmos resultados do edifício quando este é testado de maneiras diferentes.

A centralidade do desenho no processo de projeto “está sendo desafiada pela primeira vez em 500 anos, pelas ferramentas digitais, que vêm criando novas relações entre arquiteto, projeto e construção” (*Op. cit.*, p.49). Enquanto modelos digitais (simulação) representam forma, desenhos (representação) conseguem representar, simultaneamente, aspectos distintos de um projeto, cruciais para permitir ao projetista a compreensão de problemas complexos (*Op. cit.*, p.50). Com isso, o autor sinaliza a importância tanto da representação quanto da simulação, uma vez que, tanto as incertezas quanto as ideias bem definidas têm seu lugar nos processos de projeto da era digital.

Lawson (2011, p. 47) indica, genericamente, as três principais fases presentes em um processo de projeto: análise, síntese e a avaliação. Quando há aplicação de recursos computacionais no processo, Achten (2009, p.522) inclui a simulação entre as fases de

síntese e avaliação, uma vez que as ideias são simuladas um ambiente virtual. Antes de serem simuladas, porém, as ideias concretizam-se por meio da modelagem/modelação, que subsidiam a simulação. O autor defende, contudo, que com o aparecimento de novas técnicas de simulação, “a criação, modelagem/modelação e simulação passam a ser integradas e tornam-se uma parte fluente no ato de projetar”. Desse modo, “a simulação é usada de modo a guiar o processo de projeto, podendo-se dizer que é a condutora do processo de projeto (*design driver*)”. (Op. cit., p. 522).

Figura 7 – Posição tradicional da simulação (esq.); Síntese, modelagem/modelação e simulação integradas, sendo a última a condutora do processo de projeto.



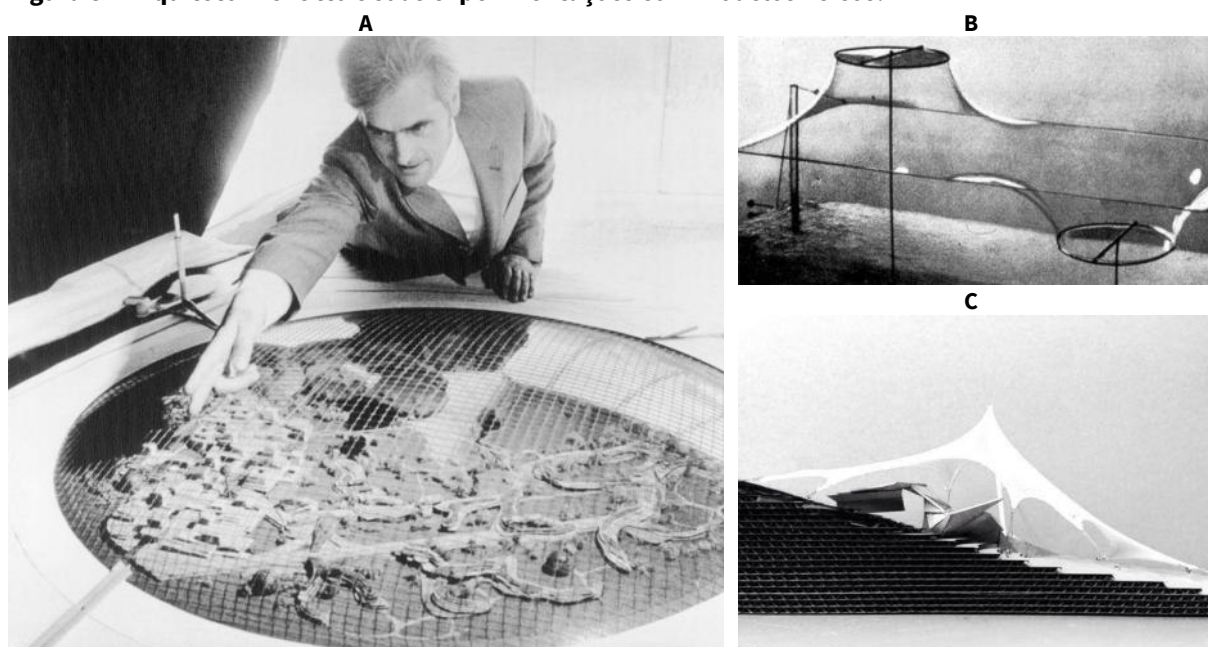
Fonte: Adaptado de Achten (2009, p.523).

Dunn (2012, p.14) afirma que a “arquitetura depende muito de fatores econômicos, sociais e culturais”. Para ele, as transformações que observamos hoje são o resultado de um processo histórico mais longo e complexo do que a direta adoção de ferramentas digitais por projetistas. Antes do surgimento do computador, com ponto de partida na inteligência artificial, é importante destacar as obras de arquitetos como Antoni Gaudí, Frei Otto e Sergio Musmeci, que rejeitam tipologias tradicionais do início do século XX e buscam, à sua época, processos de autoformação da natureza como maneira de organizar edifícios (TEDESCHI, 2014, p.18). Os processos computacionais, no início do século XXI, vão resgatar também essa mesma filosofia, mas mudando a ferramenta: o computador. Segundo Sheil (2008, p.7), esses arquitetos foram “pioneiros ao repensar as práticas habituais do processo projetual, mas mantendo as ferramentas analógicas de desenvolvimento do projeto”.

Os arquitetos que rejeitaram tipologias tradicionais do início do século XX aplicaram métodos similares à abordagem computacional atual, mas com o uso de modelos físicos

(Figura 8). Antes do fenômeno de surgimento do computador, que teve como ponto de partida a inteligência artificial, é importante destacar as obras de arquitetos como Antoni Gaudí (Figura 9), Frei Otto, e Sergio Musmeci que, segundo Tedeschi (2016, p.18) “rejeitam tipologias e buscam, à sua época, processos de autoformação da natureza como maneira de organizar edifícios”. Processos computacionais, no início do século XXI, vão também resgatar essa mesma filosofia, embora mudando a ferramenta. Segundo Sheil (2008, p. 7), esses arquitetos foram pioneiros quando repensaram as práticas habituais do processo de projeto, mas mantendo as ferramentas. O autor defende a protoarquitetura, como a maneira de fazer arquitetura pelo uso de protótipos.

Figura 8 – Arquiteto Frei Otto e suas experimentações com modelos físicos.



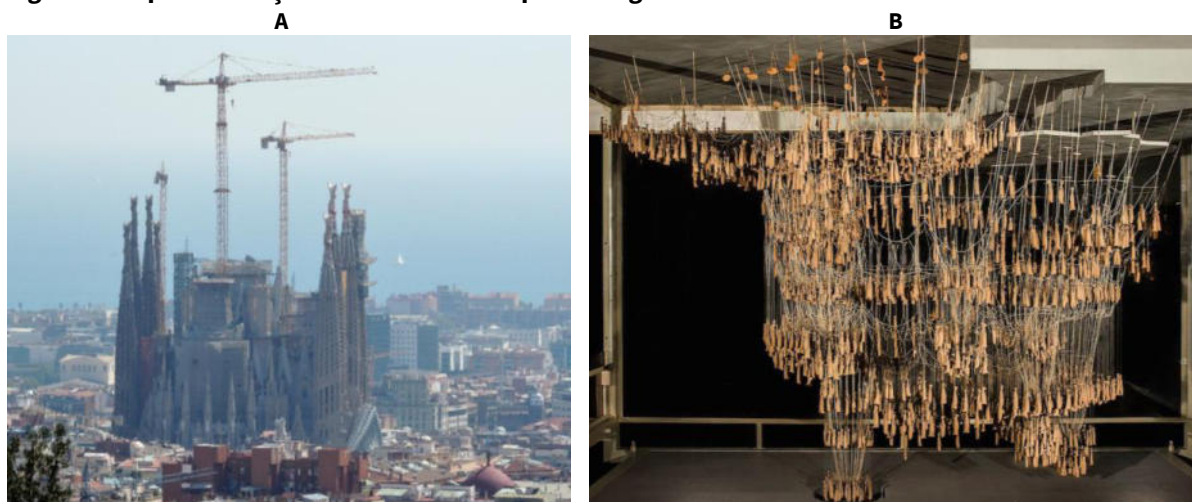
Fontes: (A) - Bettmann/Corbis (2015, p. 1, fig. 1); (B) - Yunis (2015, p. 1, fig. 1); (C) – *Op. cit.* (2015, p. 4, fig. 4).

Das obras dos arquitetos citados no parágrafo anterior, surge o termo *form-finding*, cujo sentido é a busca pela forma em fenômenos naturais, seja das forças da física ou dos processos encontrados na natureza. Tedeschi (2016, p.18) afirma que “os arquitetos pioneiros na adoção do *form-finding* debruçaram-se em modelos físicos feitos de bolhas de sabão, tecidos suspensos e estruturas de galhos”. De forma resumida, o desenho como um meio de investigação da forma foi substituído por sistemas análogos, buscadores de forma física, que demonstraram como as forças dinâmicas poderiam dar origem a novas formas arquitetônicas.

O autor classifica a obtenção do estudo da forma em dois tipos:

O *form-making*, onde a tipologia arquitetônica fez do desenho não somente um meio de comunicação, mas um sistema que permite ao projetista explorar e refinar variações, dentro de uma gama específica de condicionantes formais e estruturais; e o *form-finding*, em que o desenho convencional foi inicialmente contestado, surgido na arquitetura no final do século XIX, que teve como objetivo investigar estruturas novas e otimizadas encontradas por meio de relações complexas e associativas entre materiais, formas e estruturas (TEDESCHI, 2016, p.18).

Figura 9 –Experimentações de Antoni Gaudí para a Sagrada Família.



Fontes: (A) – acervo do autor; (B)- SG-Repository (2018, p.2, fig. 2);

Ainda segundo o autor, essa classificação pode ser definida como “o processo de autoformação pela natureza como uma maneira de reorganizar edifícios” (*Op. cit.*, p.18). Nesse período, o uso dos modelos físicos era imprescindível para o surgimento dessa nova maneira de conceber arquitetura, considerando que os recursos computacionais mais avançados apareceram apenas décadas mais tarde.

Essa sequência histórica de acontecimentos deixa claro que técnicas computacionais não são tão novas quanto parecem, ou não são impossíveis de serem aplicadas sem a presença da ferramenta computacional. Assim, Agkathidis (2015, p. 9) indaga se são as ferramentas ou o método projetual da tão chamada arquitetura digital que devem ser atacados pela crítica.

Durante o final da década de 1980 e início da década de 1990 e antes da ampla difusão da arquitetura computacional, Peter Eisenman, influenciado pela teoria do desconstrutivismo de Jacques Derrida, começou a aplicar um conjunto de técnicas de

projeto, como o escalonamento, o fracionamento, a sobreposição e a superposição. Conforme constatado por Agkathidis (2015, p.14), Eisenman aplica tais teorias em obras como a sede da Nunotani Corporation, em 1992 (Figura 10).

Figura 10 – Edifício sede da Nunotani Corporation.



Fonte: Eisenman (1992, p. 1, fig. 1)

As tecnologias digitais do início da década de 1990 estavam mudando e, de acordo com Carpo (2017, p. 9), algumas estavam revolucionando a sociedade, economia, cultura e quase todos os aspectos da vida cotidiana. As mudanças foram tantas e tão rápidas, que os arquitetos começaram a cogitar que a maneira de pensar o projeto deveria mudar também. O desenvolvimento de novas ferramentas digitais para projeto e a fabricação representou uma mudança tanto na forma dos edifícios quanto na sua execução.

Isso pode ser observado na prática arquitetônica sobretudo em grandes escritórios de renome internacional, mas também em iniciativas acadêmicas. Em suas pesquisas, Gramazio e Kohler (2008a, p.117) declaram adotar a estratégia de “testar soluções iniciais por meio de pequenos passos e experimentos”. Assim, eles buscaram integrar a tecnologia em projetos que estavam sendo efetivamente construídos, submetendo suas ideias potenciais às viabilidades econômica e tecnológica. Achten (2009, pp. 507-530), por outro lado, advoga a experimentação nos processos de projeto como algo valioso e peculiar para cada realidade encontrada pelos projetistas.

Resnick (2017, p. 125) aponta que os bons exploradores (*thinkereres*) “aproveitam o lado bom do inesperado; usam experiências pessoais; e usam materiais familiares de maneiras não familiares”. Como resultado, os bons exploradores acreditam em prototipagem e interações rápidas. O autor reforça que durante a projeção, eles constroem algo rapidamente, testam, obtêm reações de outras pessoas e depois fazem uma nova versão, repetindo o processo.

Carmo (2017, p. 57) aponta o início dos anos 1990 como o período em que surgem as técnicas de modeladores *splines*, adotadas nas fabricantes automobilísticas francesas. Assim, nasce uma nova geração de *softwares* que, graças à sua maior disponibilidade e à sua acessibilidade econômica, permitiu a manipulação de linhas geométricas curvas diretamente na tela, usando interfaces gráficas como vetores e pontos de controle de superfícies ou curvas. A partir desse período, a geometria, que sempre foi um conhecimento basilar no processo de projeto arquitetônico, especialmente como linguagem de projeto em desenhos que utilizavam regras da geometria descritiva, de acordo com Pottman (2010, p.74), passa a tomar um novo rumo. Corroborando com a sua constatação, Iwamoto (2009, p.5) afirma que:

“(…) À medida que o processo de concepção dos desenhos sai do analógico para o digital, o desenho dos edifícios não sofre reflexos dessa mudança. Foi preciso a modelagem computacional tridimensional e a fabricação digital entrarem em cena, para energizar a forma de pensar o projeto e expandir as fronteiras da forma arquitetônica e da construção.

Burry (2011, p. 81) indica uma redução progressiva na ênfase dada à geometria descritiva nos currículos ao longo dos anos de formação dos arquitetos. De entre outros fatores para este fenômeno, estão a aplicação de máquinas CNC capazes de fabricar qualquer geometria enviadas diretamente de arquivos do computador dos projetistas. Assim, segundo o autor, passa a perder sentido o uso de protocolos restritos, normalmente ortogonais, verticais e planares, baseados no uso de uma gama específica de geometrias.

Ao evitar a consideração matemática da geometria, Burry (2011, p. 89) indica que os arquitetos “podem estar “brincando” como escultores, independentemente da sofisticação espacial, mas a matemática pode permitir diferentes níveis de conversação, especialmente entre arquitetos e engenheiro.”

Na esteira da discussão acerca do novo papel que o estudo da geometria pode ter no projeto de edifícios, Peters e Peters (2013, p. 19) indicam que um grupo de especialistas começa a discutir a recaptura do projeto paramétrico e computacional na arquitetura. Nomeado como *SmartGeometry (SG)*, ou Geometria Inteligente, o grupo foi fundado no ano de 2001. A intenção dos especialistas foi, segundo o autor (*Ibidem*, p.164), alimentar uma comunidade para disseminar a condição de transdisciplinaridade no estudo da geometria, comum a projetistas, matemáticos, geômetras e engenheiros.

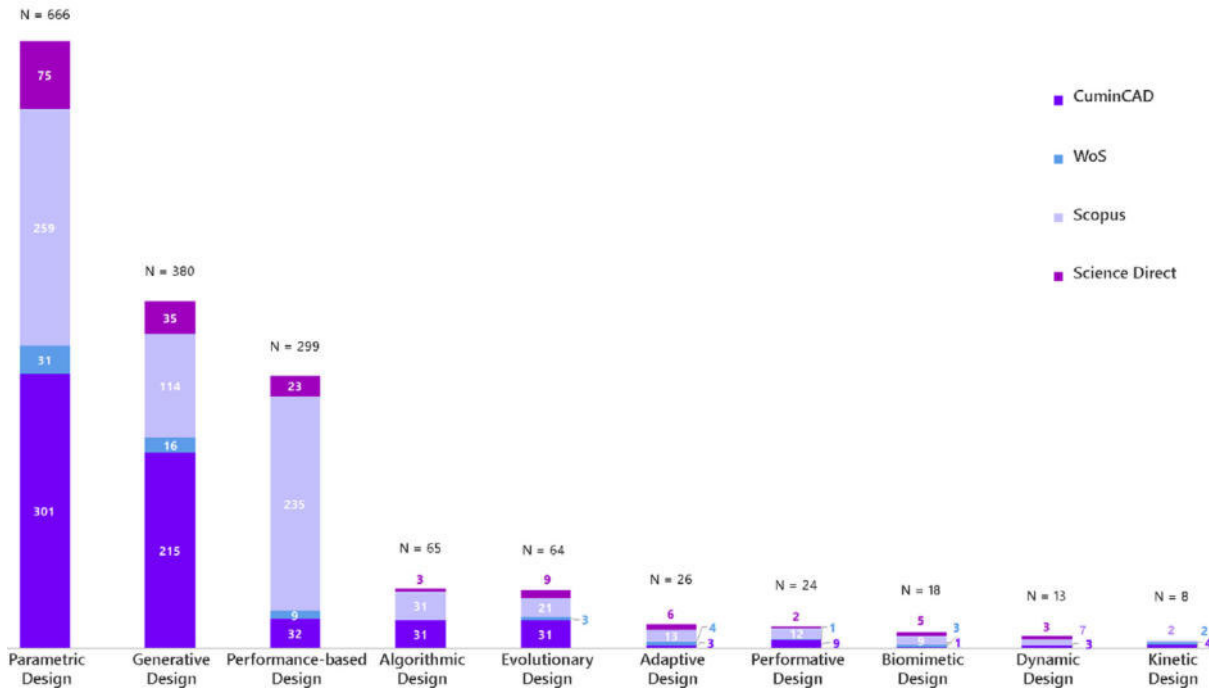
Com o desenvolvimento de diversos *softwares* da plataforma *Computer-Aided Design (CAD)*, a variedade de ferramentas disponíveis para arquitetos, que podem influenciar a produção arquitetônica, é maior do que em qualquer outra época (Dunn, 2012, p.6). Ferramentas como a modelagem paramétrica, generativa ou algorítmica, segundo Agkathidis (2015, p.8) “proporciona novos caminhos projetuais a arquitetos por meio da quebra de relações previsíveis entre forma e representação, em favor das complexidades geradas computacionalmente”. As novas ferramentas digitais desafiam profissionais da prática que trabalham com CAD – arquitetos e estudantes precisam agora aprender como usar bem as novas tecnologias (WOODBURY, 2010, p.2).

Não há um consenso na literatura quanto ao uso dos termos relacionados aos métodos de projeto computacional em arquitetura. Caetano et al. (2020, p.287-300) apresentam um amplo levantamento em eventos científicos e periódicos especializados da área, que mostra a recorrência dos principais termos ligados ao projeto computacional: o uso dos termos Projeto Generativo (*Generative Design - GD*), Projeto Algorítmico (*Algorithmic Design - AD*) e Projeto Paramétrico (*Parametric Design-PD*), como ilustrado na Figura 11.

Os autores propõem uma definição para cada um dos termos, baseados na convergência de significados encontrados na literatura:

- Projeto Generativo: é uma abordagem de projeto que usa algoritmos para a geração de alternativas projetuais;
- Projeto Algorítmico: é uma abordagem do Projeto Generativo caracterizada pela correlação identificável entre o algoritmo e o seu resultado;
- Projeto Paramétrico: é uma abordagem de projeto baseada no uso de parâmetros para descrever uma série de alternativas projetuais.

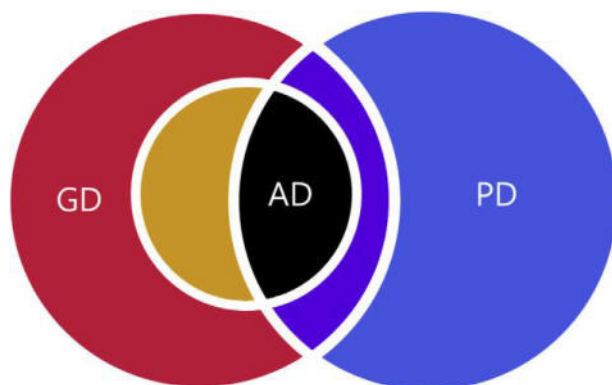
Figura 11 – Número de vezes que os termos do projeto computacional aparecem na literatura entre 1978 e 2018.



Fonte: Caetano et al. (2020, p. 291, fig. 3)

Optamos por nomear os processos de projeto investigados no âmbito desta tese de paramétricos, por quatro razões principais: 1) é o termo mais recorrente na literatura; 2) por serem projetos que aplicaram algoritmos geradores de alternativas projetuais; 3) por haver correlações identificáveis entre o algoritmo e o resultado geométrico; e 4) por serem abordagens projetuais que aplicaram parâmetros para a obtenção de alternativas projetuais. Isso implica que, de acordo com a classificação de Caetano et al. (2020, pp.287-300), os processos de projeto analisados nesta tese encontram-se nas zonas preta e roxa da Figura 12. Significa dizer que os projetos paramétricos a serem apresentados nos próximos capítulos se enquadram nas três classificações (GD, AD e PD). Resumidamente, o termo aqui utilizado refere-se a projetos em que há o uso algoritmos geradores de alternativas controladas por parâmetros, que estão condicionados pelos materiais e métodos construtivos dos edifícios.

Figura 12 – Representação conceitual da extensão dos termos do paradigma do projeto computacional.



Fonte: Caetano et al. (2020, p. 295, fig. 8)

A modelagem paramétrica, enquanto ferramenta amplamente implementada em abordagens computacionais do projeto, é conceituada por diversos autores. De entre as definições mais citadas está a de Woodbury (2010, p.11). Para ele, “a modelagem paramétrica apresenta uma mudança fundamental na maneira de projetar: as partes do projeto relacionam-se e mudam juntas de modo coordenado. Projetistas não adicionam nem apagam elementos”. Segundo o autor, eles agora “adicionam, apagam, relacionam e reparam” (p.11). O ato de relacionar requer pensamento explícito acerca do tipo de relação desejada. Reparar ocorre depois de apagar algo, quando as partes que dependem de uma parte apagada são relacionadas a partes que permanecem no projeto. Relacionar e reparar impõem as mudanças fundamentais dos sistemas e do trabalho que é feito com eles.

A peculiaridade da modelagem paramétrica em comparação à modelagem geométrica é que “a criação de regras se transforma em procedimentos projetuais básicos, através da configuração de modelos tridimensionais do projeto paramétrico” (OXMAN; GU, 2015, p.478). Nesses tipos de projeto, o arquiteto expande a capacidade de “integrar informação no processo de projeto sem perder o controle sobre ele” (GRAMAZIO; KOHLER, 2008a, p.104). Para os autores, o projetista “se envolve na seleção de parâmetros arquitetônicos relevantes e, subsequentemente, na definição de regras e processos”. Scheer (2014, p.141) define o projeto paramétrico como aquele em que as “formas são geradas por uma série de valores (parâmetros) e procedimentos computacionais (algoritmos) que caracterizam as propriedades formais de uma geometria”.

O conhecimento que envolve o projeto paramétrico:

“...tipicamente compreende séries de regras interrelacionadas e interdependentes que embasam a interpretação, geração e análise do projeto. Essas regras, juntas, capturam não apenas o estado final do projeto (o produto), como os modos como o estado final foi alcançado (o processo), juntamente com as demais alternativas projetuais que foram testadas e rejeitadas (os potenciais) (GU; OSTWALD, 2012, p.415).

O meio da programação computacional “permite aos arquitetos modelar e controlar sequências complexas da tomada de decisões, refinando-as em um processo iterativo” (GRAMAZIO; KOHLER, 2008c, p.181). Para os autores, quando se projeta a partir de processos materiais, não se tem um plano estático. Ao contrário disso, há um conjunto de regras dinâmicas. Assim, os “**arquitetos projetam comportamento**” (p.181, *tradução e grifo nosso*). Para os autores Gu e Ostwald (2012, p.415), “um dos principais desafios é usar essas novas tecnologias além da geração da forma, alcançando uma gama mais ampla de valores projetuais”, e a **construtibilidade** do edifício projetado é um desses itens.

Normalmente, durante o processo de criação e desenvolvimento de um projeto de arquitetura,

...características específicas de partes desenhadas são revisadas e modificadas muitas vezes. Para responder a este problema foi desenvolvida uma estrutura, embutida em programas gráficos computacionais, baseada em parâmetros e hierarquia: as variações paramétricas (FLORIO, 2012, p.44).

O uso de “parâmetros para definir a geometria de elementos construtivos, no âmbito da construção civil, tem provado ser cada vez mais eficaz no processo de projeto” (Ibidem). O autor indica ainda que:

O poder dos computadores está na sua capacidade de calcular rapidamente complexas fórmulas matemáticas. No âmbito do projeto de edifícios, este fato tem permitido viabilizar geometrias complexas, introduzindo a possibilidade de criar e manipular novas famílias de formas e de superfícies curvas. Novas ferramentas computacionais, em ambientes paramétricos, permitem programar as dependências entre componentes, por meio do uso de variáveis, chamadas parâmetros. Estes permitem construir regras, traçar relações entre os pontos de uma curva, e definir o relacionamento e dependência entre eles. Portanto, as curvas derivadas deles capacitam a criação de superfícies curvas controladas parametricamente” (*Op. cit.*, p.45).

Há diferentes caminhos na hora de estabelecer parâmetros. “A modelagem paramétrica por *scripts* é extremamente eficiente para programar algoritmos complexos” (Ibidem). Também é possível executar a modelagem paramétrica com recursos de “programação visual sem a necessidade de digitar sequer uma linha de código em texto” (CELANI; VAZ, 2012, p.4). De acordo com esses dois autores, ao invés de apresentar uma interface para escrever linhas em um compilador, esses programas contêm uma área de trabalho em que podem ser introduzidos componentes que irão constituir o “código” que realizará a tarefa. Dois exemplos deste tipo de software são o *Generative Components* e o *Grasshopper*. O primeiro é um módulo do aplicativo *Microstation* da empresa Bentley, enquanto o segundo é um *plug-in* para o programa *Rhinoceros* da empresa McNeel. Segundo Florio (2012, p.45), programas como esses “têm facilitado o trabalho daqueles que não são programadores, ou mesmo daqueles que não possuem interesse em realizar a verdadeira programação”. Para o autor, “essas ferramentas de projeto paramétrico utilizam a Linguagem de Programação Visual (LPV), um tipo de programação em que os algoritmos são manipulados visualmente, em interface amigável para arquitetos” (Ibidem).

Scheer (2014, p.34) constata que, usualmente, os “arquitetos não têm tempo para verificar e validar, de maneira independente, as ferramentas digitais” que estão no mercado. Eles têm que confiar nos representantes dos *softwares*, cujos produtos são resultado de modificações constantes, ao invés de serem direcionados ao processo de projeto. Ao migrar de ferramentas fornecidas por *softwares* tradicionais, a experiência “*hands-on*” em programação permite um entendimento desmistificado de tecnologias digitais e uma abordagem autônoma e livre ao computador. Consequentemente, ocorre uma “emancipação dos instrumentos CAAD existentes, com seus instrumentos e paradigmas pré-estabelecidos, fixados no menus, que obedecem a funções tradicionais do desenho” (GRAMAZIO; KOHLER, 2008c, p.180).

Scheurer (2012, p.111) também constata as vantagens da adoção da programação computacional na arquitetura quando afirma que, “não importa quantas novas funcionalidades são adicionadas, uma ferramenta padrão sempre irá funcionar para projetos padrão”, que normalmente não são objetivados por projetistas que adotam ferramentas paramétricas. Marble (2012, p.8) cita os *scripts* customizados como

ferramentas que abrem oportunidades para inovação em um nível central, que se estende além de um único projeto.

A parametrização não pode ser entendida, convencionalmente, como apenas as interdependências de certas restrições geométricas. Em sua compreensão mais aprofundada, é “o estabelecimento de métodos de inter-relação entre determinados comportamentos de formas e forças, e como elas podem ser representadas enquanto regras de associação matemática e geométrica” (AHLQUIST; MENGES, 2011, p.19).

Quanto ao uso dessas ferramentas aplicadas ao processo de projeto, Woodbury (2010, p.47) define o meio paramétrico como complexo, talvez mais do que qualquer outro já utilizado na história do projeto.

O contexto da era digital na arquitetura, em especial aquele em que projetistas utilizam a modelagem paramétrica como recurso, requer uma prática visual capaz de acompanhar interações entre o global e o local, entre a definição geral do projeto e as mudanças trazidas pelas variações paramétricas. Assim, “a menor mudança pode afetar o *design* como um todo, como na conhecida afirmação da teoria do caos de que a vibração de uma borboleta em uma parte do mundo pode causar uma tempestade em outra” (PICON, 2010, s.n). A seleção de parâmetros durante o processo de projeto pode ser feita de maneira suave ou em grande detalhe, à medida que a multiplicidade de possibilidades combinatórias aparece Klinger (2008, p.28).

Para Ahlquist e Menges (2011, p.26), “processos de projeto computacionais consistem em duas condições: como eles funcionam e de que eles consistem”. Os autores apontam o primeiro ponto como a descrição dos parâmetros de materialidade, enquanto o segundo descreve as influências que irão ativar essas restrições materiais para arranjá-las de um modo particular.

Os três pontos a seguir são características genéricas trazidas por Oxman e Gu (2015, p.478) no processo de projeto paramétrico:

- Os projetistas criam regras e definem as suas relações lógicas na criação do modelo de visualização tridimensional;
- Os projetistas podem alterar e modificar o próprio projeto em qualquer estágio;

→ As alternativas de projeto podem ser desenvolvidas em paralelo em qualquer estágio.

Projetar usando algoritmos exige que as regras definidas sejam bem delineadas: os “métodos de projeto baseados em regras são uma das mais populares e efetivas maneiras de instruir e aprender como completar uma tarefa” (KALAY, 2004, p.22). O autor destaca ainda que, como as “regras podem ser usadas para capturar qualquer processo conhecido, elas se tornaram o método de escolha de programadores de computador, instruindo-os como eles podem completar as tarefas” (KALAY, 2004, p.22). No projeto paramétrico, quando o arquiteto assume também a tarefa de programador, a habilidade no manuseio de regras e as suas inter-relações parece ser um requisito fundamental.

De acordo com Pottman (2010, p.74), o efetivo uso de poderosos *softwares* de desenho geométrico exige conhecimento em geometria, além do tradicionalmente ensinado em disciplinas de desenho técnico, e é necessário um entendimento ainda mais profundo dessa área da matemática para compreender a tecnologia de projeto paramétrico.

Usá-lo bem, segundo o autor:

...necessariamente combina o uso de fluxo de dados, estratégias de divisão e conquistas, nomeação, abstração, visualização 3D e matemática, e pensamento algoritmo. O autor defende que o domínio das técnicas da modelagem paramétrica requer que o profissional seja parte projetista, parte cientista da computação e parte matemático (POTTMAN, 2010, p.74).

Como consequência disso, Woodbury (2010, p.8) afirma que muitos dos melhores e mais brilhantes projetistas, em sua maioria jovens, possuem essas características e estão produzindo o novo.

Scheurer (2010, p.20) defende que, no tocante à aplicação de algoritmo em projeto por meio das ferramentas disponíveis, duas tarefas permanecem as mesmas:

[...] primeira, abstrair, de um conjunto de problemas individuais, um conjunto de soluções, com um conjunto mínimo de parâmetros, que apontam para uma gama de soluções grande o suficiente para acomodar todas as variáveis necessárias; e segundo, lista todas as variáveis individuais com os valores paramétricos corretos.

Portanto, o trabalho simplesmente não desaparece, ele apenas muda para um nível superior de abstração: programação ao invés de desenho.

Apesar de exigir muito esforço de aprendizagem, o autor defende que o algoritmo é mais fácil de manusear do que um conjunto de desenhos. A mudança para a plataforma, no entanto, vem com um custo. Leva energia na forma de consumo de ações cerebrais para se acompanhar um algoritmo inteligente. Esse desenvolvimento é transformativo à medida que ocorre um envolvimento do projetista com a era da informação, cuja tecnologia leva a maiores possibilidades de criação, onde as ideias passam a romper as barreiras tecnológicas, levando ao surgimento de inovação e exploração (DUNN, 2012, p.32). Contudo, o arquiteto Arnold Walz reflete, em entrevista concedida a Sedrez e Celani (2014), que “o computador é uma ferramenta, e você é responsável pelos resultados, pois você desenvolveu o algoritmo. É a sua decisão. Mesmo que você não tenha entendido o algoritmo, você ainda o escolheu”.

Ferramentas CAD e BIM podem conter modelagem a partir do controle de parâmetros sem que haja necessariamente a manipulação de algoritmos. Contudo, as possibilidades de variação limitam-se à manipulação de parâmetros pré-determinados dessas ferramentas em caixas de diálogo pré-configuradas pelos fabricantes das aplicações computacionais.

O algoritmo é um procedimento computacional para resolver um problema em um número finito de passos. Envolve “dedução, indução, abstração, generalismo e lógica estruturada” (TERZIDIS, 2011, p.94). Ainda segundo o autor, estratégias algorítmicas utilizam a busca por repetidos padrões, princípios universais, módulos intercambiáveis e ligações indutivas. Ele aponta que o poder intelectual de um algoritmo está na habilidade de inferir novo conhecimento e de estender certos limites do intelecto humano.

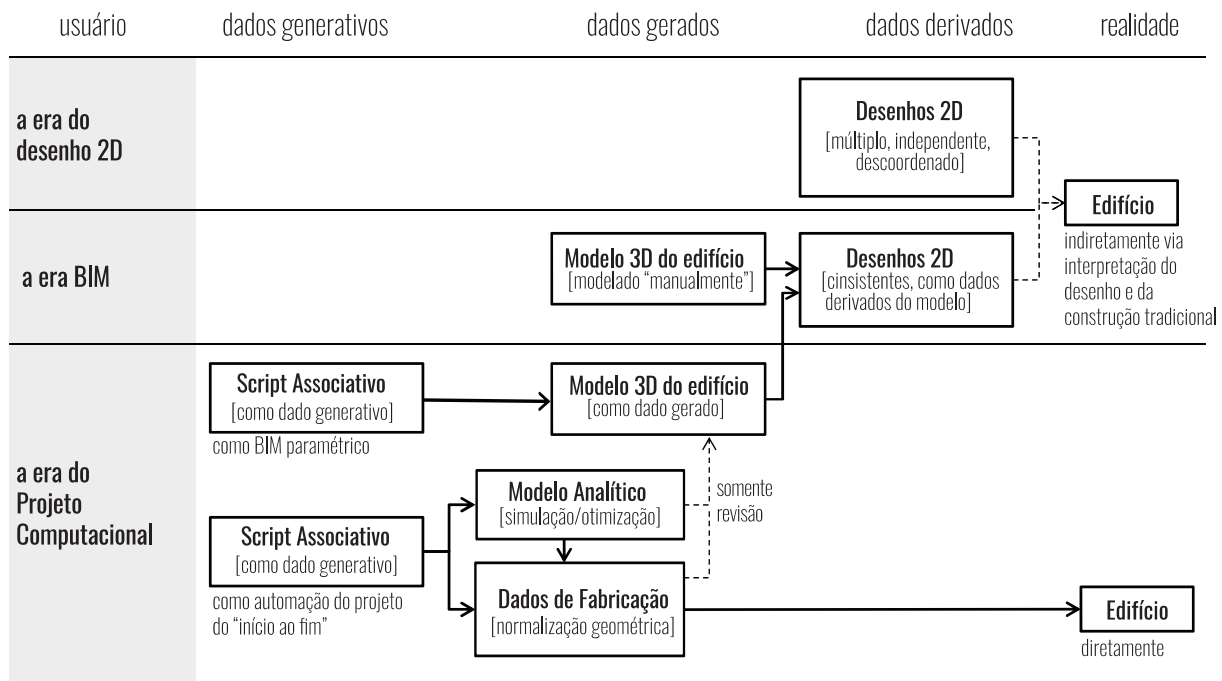
Enquanto muitos algoritmos são criados para automatizar métodos manuais tediosos, existe uma certa categoria deles que não objetiva resultados previsíveis. A sua estratégia indutiva é “explorar processos generativos ou simular um fenômeno complexo” (TERZIDIS, 2011, p.95). Similarmente em projeto, o autor atesta que “gramática da forma, modelos matemáticos, propriedades topológicas, sistemas genéticos, mapeamentos e morfismos são processos algorítmicos com o objetivo de explorar o incomum, o

imprevisível, as propriedades formais não mapeadas e os comportamentos” (TERZIDIS, 2011, p.95).

As duas atividades opostas centrais para a composição do algoritmo como modo de pensamento são a invenção e a descoberta. “A invenção é definida como o ato de fazer algo existir pelo uso da ingenuidade ou imaginação. A descoberta é o ato de encontrar, pela primeira vez, algo que já existia” (TERZIDIS, 2011, p.95).

O resultado do processo de modelagem computacional “não é simplesmente uma forma ou objeto, mas uma grande gama de soluções de projeto” (GALLAS *et al.*, 2015, p.152). Dessa maneira, destaca-se que a forma algorítmica não trata da percepção ou interpretação. Ao invés disso, é o processo de exploração, codificação e extensão da mente humana (TERZIDIS, 2011, p.99). Isso possibilita ao projetista escolher, rapidamente, entre essas alternativas de solução criadas, dando mais possibilidades de resultados.

Aish (2013, p. 39) apresenta, sumariamente, três eras do projeto arquitetônico assistido por computador (Figura 13). Segundo o autor, houve um primeiro momento em que os arquitetos tomam partido dos computadores apenas para desenhar representações bidimensionais do projeto, que alimentam a construção edifício. Em seguida, a era BIM, em que os desenhos bidimensionais são extraídos de um modelo tridimensional do edifício. Por último, o projeto computacional, em que *scripts* resultam na criação de um modelo analítico do edifício. A partir deste modelo, pode-se gerar um modelo tridimensional do edifício, como no BIM, a partir do qual são geradas representações bidimensionais; ou o modelo analítico pode gerar arquivos/ficheiros que podem ser enviados diretamente a um maquinário de fabricação digital, que materializa partes do edifício.

Figura 13 – As três eras do projeto arquitetônico assistido por computador.

Fonte: Adaptado de Aish (2013, p. 41, fig. 7).

Apesar de toda a complexidade envolvida na adoção da modelagem paramétrica na arquitetura, Dunn (2012, p.25) defende que

É importante entender que esses métodos não têm vida própria, eles formam parte de um *kit* de ferramentas mais abrangente para o projeto de arquitetura, que também inclui modos tradicionais de criação e representação como os esboços, desenhos, modelagem física e pintura.

A diversidade do uso dos meios de concepção e representação aparece no modelo de concepção arquitetônica idealizado por Lebahar (1999, p.44). Nele, o autor indica que o ato de concepção arquitetônica exige do arquiteto competências de áreas multimeios e multidomínios. Elas servem como mecanismos para simular e reduzir incertezas que emergem durante o processo de projeto.

A pouca exploração de multimeios projetuais pode interferir de modo indesejado no processo projetual. O uso estrito do meio computacional de projeto, por exemplo, pode incorrer nessas situações. Segundo Carvalho (2004, p.234), “o esboço no computador pode vir a prejudicar a exploração e o desenvolvimento das soluções alternativas e forçar a cristalização prematura da solução de projeto”.

Enquanto planos e croquis ainda são o meio mais comum de apresentação entre arquiteto e cliente, existe uma crescente adesão da modelagem 3D dinâmica (LAING, 2019, s.n). Para o autor, os estudantes de arquitetura de hoje são introduzidos ao projeto arquitetônico assistido por computador (CAAD) de modo natural, e uma gama de novas ferramentas têm surgido para facilitar e agilizar o desenho e o projeto utilizando computadores.

Scheer (2014, p.52) defende o uso do desenho de modo semelhante ao de Carvalho (2004, p.234), quando menciona que a ideia converge gradualmente e ganha forma em desenhos, que servem como ponto de chegada para o processo de projeto.

Scheer (2014, p.2) cita o dilema existente entre a adoção de recursos manuais e computacionais. Segundo ele, “arquitetos mais jovens e estudantes se aprofundam em mundos virtuais, e poucos aprendem a desenhar. Arquitetos mais velhos lutam para entender a melhor maneira de usar essas tecnologias e manter seus escritórios competitivos”. O autor indica ainda o desenho como essencial para a arquitetura, como “ligação entre pensamento, projeto e construção” (*Op. cit.*, p.3). Scheer (2014, p.176) defende o “engajamento em um **processo de projeto híbrido entre digital e material**” (*grifo nosso*). Esse tipo de processo proporciona investigações digitais e materiais simultaneamente, e faz com que sejam complementares.

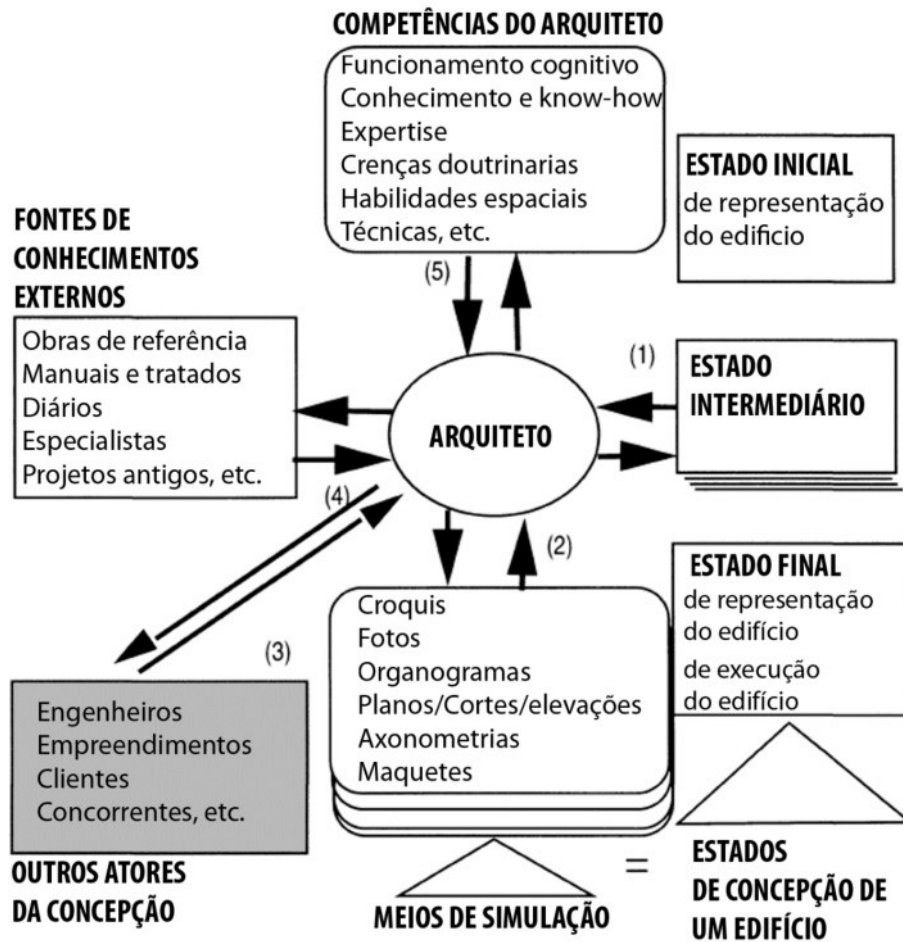
No modelo de Lebahar (1999, p.44), uma das interações existentes entre o arquiteto e as simulações de soluções e problemas são os meios de simulação. O uso desses meios requer várias habilidades, notadamente espaciais (interpretar mentalmente um desenho em duas dimensões, em um volume em três dimensões), mas também capacidades estratégicas que consistem em construir, em cada etapa do processo, o desenho mais rápido e mais adequado para o problema a ser tratado.

Achten (2009, p.507) lista seis principais fontes para a (r)evolução digital: gerenciamento de complexidades com o uso da informática; novos materiais e técnicas de construção; prototipagem rápida; uso versátil de meios projetuais; comunicação e internet; e BIM. Essas fontes listadas reforçam o que defende Lebahar (1999, p.45), pois para aplicá-las, é necessário que os projetistas tenham várias habilidades.

Note-se que os meios de simulação de Lebahar (1999, p.44) diferem-se do termo simulação do edifício utilizado por Sheer (2014, p.9), pois para o primeiro autor, a simulação pode ocorrer por meios de concepção e representação analógicos ou digitais. O segundo autor lista simulação como o meio de simular a construção do edifício, e não inclui mecanismos de representação, como os desenhos bidimensionais.

Kalay (2004, p.25) também menciona o uso de diversas maneiras de conceber e representar o projeto. Para ele, como outros métodos de projeto, o uso de protótipos, precedentes e metáforas tem a intenção de promover ao projetista um ponto de partida do qual se pode desenvolver um novo projeto (*Op. cit.*, p.25). Laing (2019, s.n) menciona que os métodos de projeto que incluem mecanismos digitais “devem incluir o uso do croqui, do desenho técnico e de modelos físicos, comumente aplicados para ajudar projetistas a formularem ideias, promovendo um processo interativo”. Dessa maneira, reforça o autor, os recursos analógicos podem “facilitar e potencializar o uso de técnicas digitais”. Laing (*Op. cit.*) também menciona a pluralidade e estabelece a importância da vocação dos meios projetuais, ao dizer que “o meio projetual pode auxiliar, influenciar e, em alguns casos, conduzir os resultados do projeto propriamente dito”.

O uso de múltiplas ferramentas durante o processo de projeto pode ser um facilitador, apesar da dificuldade de muitos projetistas em adotar novas tecnologias. Em projetos computacionais, “a tecnologia pode ser, ao mesmo tempo, uma facilitadora e uma restrição” (O'BRIEN; SOIBELMAN; ELVIN, 2003, p.92). Normalmente, usuários de modelagem paramétrica considerados especialistas “podem reduzir o tempo gasto na geração do modelo paramétrico e dar mais foco às atividades de projeto. Já a atividade de usuários novatos, é considerada como uma restrição adicional, que influencia o processo de projeto” (GALLAS *et al.*, 2015, p.152).

Figura 14 – O projeto em arquitetura: uma situação profissional de concepção.

Fonte: Adaptado de Lebahar (1999, p.44).

Para Picon (2010, s.n), o projeto arquitetônico é de fato um objeto virtual. Tanto que não prevê uma única obra construída, mas toda uma gama delas. Não há projeto arquitetônico sem alguma margem de indeterminação que permita seguir diferentes caminhos. Normalmente, apenas uma será a edificação construída. Desse modo, pensar o projeto em ambiente computacional deve trazer consigo o conhecimento da “modelização presente na concepção arquitetural” (BOUDON *et al*, 2000, s.n), para que haja a presença do espaço real no processo de concepção arquitetural por meio da *embrayage* (ligação entre o concebido e o executável). É nesse ambiente em que a **construtibilidade** do edifício emerge, como um quesito indispensável ao processo de projeto.

1.2 Materialidade e Construtibilidade

O termo **materialidade** significa, conforme definição do dicionário Aurélio, “a qualidade do que é material”. Em arquitetura, autores da área de projeto utilizam o termo materialidade sob duas óticas. A maneira como Picon (2010, s.n) utiliza a palavra indica um sentido próximo ao do que é indicado no dicionário, dando significado amplo à palavra. Para Viana e Rheingantz (2012, p.23), trata-se da “produção de espaços físicos”, ou seja, do ambiente construído. Outros autores (BERNSTEIN, 2008; KOLAREVIC e KLINGER, 2008; MANGELSDORF, 2010) utilizam o termo com a mesma conotação, dando a entender que a materialidade é o edifício construído.

Anos mais tarde, em nova publicação, Picon (2020, p.10) traz um conceito de materialidade que associa o físico ao pensamento humano. Ele afirma que “o conceito de materialidade não pode ser utilizado da mesma maneira que matéria e materiais”, pois ele designa “a dimensão material de um fenômeno, uma coisa, um objeto, ou um sistema em relação ao pensamento humano e à prática (*Op. cit.*, p.10).

Gramazio e Kohler (2008b, p.7) introduziram o termo **materialidade digital na arquitetura**. Os autores dizem que ela “**é gerada quando ocorre a integração entre construção e programação no processo de projeto**”, de modo que os mundos digital e material, a princípio distintos, geram juntos novas realidades (*grifos nossos*). A informação e o material, a programação computacional e a construção estão entrelaçados. A materialidade digital, para Gramazio e Kohler (2008b, p.7), é “uma emergente transformação na expressão da arquitetura”. Para eles, a “materialidade tem sido enriquecida por características digitais, interferindo substancialmente na *physis* (natureza) da arquitetura”. Como consequência, eles afirmam que a materialidade digital “transforma as possibilidades arquitetônicas, assim como o escopo profissional do arquiteto”.

De modo mais amplo, Picon (2010) corrobora com essa afirmativa quando defende que a materialidade provavelmente permanecerá como um recurso fundamental da produção arquitetônica. Nesse sentido, Gramazio e Kohler (2008c, p.180) defendem, no seu

conceito de materialidade digital, que “projeto e execução não são mais distintos, e o projeto incorpora o conhecimento da sua produção já no momento de sua concepção”.

Em uma perspectiva futura, Gu e Ostwald (2012, p.417) argumentam que “as tecnologias computacionais de projeto, enquanto novos elementos, podem transformar o ambiente construído em ambientes interativos e inteligentes, em que o físico e o digital estão interligados”.

Consideraremos, para esta tese, um significado ainda mais amplo do que os apresentados pelos autores citados, por entender que a materialidade na arquitetura também pode se apresentar através da simulação da matéria através da elaboração de modelos, sejam eles em escala reduzida, ou em escala 1:1.

A **construtibilidade** acontece quando ocorre a integração entre três campos de conhecimento: construção, planejamento e projeto (MENDELSON, 1997, p.17). Esse é, porém, um conceito geral, que não lista requisitos objetivos. Construtibilidade (*constructability*) possui diversos conceitos, trabalhados por inúmeros autores. A tese de Nima (2001) lista 23 conceitos diferentes para o termo, que pode dar uma variação ao entendimento da palavra e sua aplicabilidade na pesquisa. Dentre eles, destacamos aqui os três que consideramos mais significativos:

- 1) Integração efetiva entre projeto e construção, alcançada pela combinação entre a exploração de conhecimentos atualizados em construção e a experiência, trazidos por profissionais praticantes, nas fases precoces de planejamento conceitual e do projeto preliminar.
- 2) O uso otimizado de conhecimento em construção e experiência em planejamento, projeto e aquisição de materiais.
- 3) O uso e seleção antecipados de métodos construtivos adequados ao projeto, objetivando procedimentos fluidos na obra.

A partir desses três conceitos listados por Nima (2001, s.n), propomos uma adaptação do primeiro termo, que será aplicado nesta tese: **a construtibilidade trata-se dos métodos e das condições necessárias para promover a construção do edifício**. Ela pode ser alcançada por meio da **incorporação de conhecimentos em construção ao processo de projeto, oriundos da experiência e das habilidades dos projetistas**.

Segundo Kifokeris e Xenidis (2017, p.6), a construtibilidade aparece em três fases diferentes: fase de iniciação, fase de execução e fase de entrega. Essas três fases podem ser traduzidas, respectivamente, como o projeto, a construção e a operação do edifício. A fase de iniciação, ou projeto, que julgamos ser a mais decisiva, envolve os três seguintes requisitos:

- (1) promover o programa de construtibilidade como o início de uma abordagem gerencial do plano de execução do projeto;
- (2) certificar-se que o fluxo de conhecimento e *expertise* através de um processo de comunicação aberto entre os colaboradores, e determinar os fundamentos para recursos, planos e métodos construtivos realísticos; e
- (3) gerar e avaliar opções alternativas tão cedo quanto o estudo de viabilidade para que as requisições do construtor possam ser conduzidas claramente (KIFOKERIS; XENIDIS, 2017, p.6).

É relevante também destacar a presença do termo edificabilidade, que está dentro da conceituação mais ampla de construtibilidade (Figura 15). Ele é definido pela associação de informação e a pesquisa da indústria da construção, como “a extensão no qual o projeto de um edifício facilita a sua construção” (KIFOKERIS; XENIDIS, 2017, p.3). Não inclui, porém, os requisitos específicos para isso, como destacado nos itens 2 e 3 da fase de iniciação.

Figura 15 – Relações e conexões entre construtibilidade, edificabilidade, programa de construtibilidade, e conceitos científicos relevantes.



Fonte: Adaptado de Kifokeris e Xenidis (2017, p.4).

Os termos materialidade e construtibilidade não podem ser confundidos. O primeiro está relacionado ao que é material, e relaciona-se, com modelos físicos, protótipos construtivos e o edifício propriamente dito. O segundo, por sua vez, refere-se ao processo em que se chega à materialidade do edifício, estando profundamente ligado ao ato de incorporar métodos e condições para que se promova a construção do edifício.

Outro conceito próximo, mas distinto em significado, é o da tectônica, noção retomada por Frampton nos anos 1990, com a publicação do livro “*Studies in Tectonic Culture*”. Em arquitetura, existem abordagens correlatas, mas não exatamente como o mesmo sentido da construtibilidade aqui adotado. Piñón (1998, p.92), por exemplo, defende que não há concepção projetual sem consciência construtiva. O que ele chama de *tectonicidade* de um edifício deve ser pensada desde as primeiras ideias.

No âmbito do conceito da tectônica, Frampton (1996, p. 335), defende que uma boa arquitetura começa com uma construção eficiente. Para o autor, sem construção não há arquitetura, e aspectos como a topografia, o clima, o solo e os materiais disponíveis em cada local determinam os métodos construtivos, a função e a forma. O autor questiona a atenção dada, na década de 1990, a projetos desenvolvidos por computadores, criticando a ênfase à geração de imagens arquitetônicas elegantes.

Muito da arquitetura contemporânea se produziu após a sua publicação, sobretudo com o uso de abordagens computacionais avançadas para a época. Na década seguinte, motivados pela produção arquitetônica de arquitetos como Frank Ghery, Leach et al. (2004, pp.9-14) lançam o manifesto da **tectônica digital** (*digital tectonics*). Eles lançam perguntas como: o digital pode ser tectônico? o tectônico pode ser digital? (*Op. Cit.*, 2004, p.4).

Os autores argumentam, à época, que a “oposição entre o digital e a tectônica começou a colapsar, estando o digital cada vez mais a serviço da tectônica” (*Ibidem*, p.4). Isso fez surgir uma nova tectônica do digital. Nessa ótica, ainda de acordo com os autores, ocorre um novo espírito de colaboração entre arquitetura e engenharia, que tende a influenciar a produção arquitetônica por bastante tempo.

Ultrapassando diversos limites disciplinares, Menges (2011, p.199) sugere uma abordagem projetual cujas “engenharia estrutural e ambiental, que tendem a ser questões

de pós-otimização, se transformem em fatores essenciais na montagem do processo de projeto propriamente dito”.

Menges (*Op. cit.*, p.198) atesta que: “a formação (geração da forma) e a materialização, na prática arquitetônica, ainda são tradicionalmente baseadas em abordagens projetuais caracterizadas pela relação hierárquica que prioriza a definição e a geração da forma e sua subsequente materialização”. Ainda segundo o autor,

A lógica subjacente da computação no projeto sugere fortemente como alternativa que o rigor geométrico e a capacidade de simulação da modelagem computacional podem ser implantados para integrar restrições de manufatura, logística de montagem e característica dos materiais na definição de sistemas materiais e construtivos (MENGES, 2011, p.199).

Não exclusivamente utilizados na aplicação de modelos representacionais digitais, focados principalmente na geometria, esses modelos computacionais descrevem o **comportamento**, ao invés de forma. Isso permite ao projetista conceber sistemas materiais e construtivos resultantes da sinergia proveniente da mediação computacional e do sistema de fabricação. Mais profundamente, “o entendimento dos efeitos materiais se estende muito além do efeito visual da termodinâmica, acústica e modulação luminotécnica do ambiente construído” (*Op. cit.*, 2011, p.199). Na esteira da complexidade dessas questões, Gramazio e Kohler (2008a, p.117), indicam que “a verdadeira discussão acerca da arquitetura digital tem que nascer de projetos construídos que manifestam fisicamente a lógica intrínseca da tecnologia aplicada no processo”.

Quando se relacionam o uso dos recursos computacionais de projeto e a idealização do objeto arquitetônico, Picon (2004, p. 115) aponta para o impacto do computador, que traz consigo uma reformulação da experiência física e da materialidade, e não uma alienação dessa dimensão. O autor defende, ainda, que o uso do computador representa uma ascensão substancial em relação aos recursos tradicionais de representação em Arquitetura e que a abstração inerente à representação arquitetônica não implica necessariamente em uma falta de materialidade na sua representação. No tocante à relação entre concepção, representação e projeto, Cordeiro e Rocha (2017, s.n) atestam que a concepção da forma arquitetônica não prescinde dos saberes construtivos, uma vez que a tensão entre estrutura física e estrutura visual constitui um dos problemas centrais da

criação arquitetônica. Essa constatação pode ser expandida em outra afirmativa de Picon (2004, p. 115):

Um projeto arquitetônico é de fato um objeto virtual. É tão virtual que antecipa não apenas a concepção de um edifício, mas um conjunto deles. Não existe projeto arquitetônico sem uma margem de indeterminação que permite diferentes caminhos a serem seguidos, e usualmente, apenas um será construído (*Op. cit.*, 2004, p.115).

Scheurer (2012, p.110) constata que, “ao contrário dos escultores, os arquitetos raramente trabalham no seu projeto *in loco*, em escala 1:1 e com as suas mãos sujas pela manipulação do material do edifício”. Ele argumenta que

“a argila nos processos de projetos arquitetônicos, é usualmente substituída por significados não-materiais, começando pelo padrão de atividade neuronal na mente do projetista (uma ideia), e então ela vai sendo gradualmente externalizada, refinada e materializada como uma linguagem falada ou escrita, desenhos, plantas, protótipos reduzidos e assim por diante (*Op. cit.*, p.5).

A produção de arquitetura advinda de recursos computacionais dos últimos anos aplica, frequentemente, a fabricação digital⁵ como mecanismo de produção de partes do edifício, conforme apontam as publicações que trazem projetos da prática arquitetônica contemporânea, de autores como Burry e Burry (2010, s.n).

Para Iwamoto (2009, p.7), a “fabricação digital é apenas uma das fases finais desse processo e é muito do que o próprio nome já diz: uma maneira de fazer que usa dados digitais para controlar um processo de fabricação”. Perfuração, corte a laser, corte a jato de água, roteadora CNC (Controle Numérico Computacional) e corte a plasma são apenas uma parte dos processos automatizados abastecendo esse domínio de projeto.

A aplicação da fabricação digital na arquitetura é uma técnica relativamente recente (DUNN, 2012, p.20), inserida há cerca de 26 anos no debate crítico, na prática profissional e na educacional dentro das disciplinas. É uma subcategoria do CAD/CAM devido ao uso de máquinas controladas por computador como ferramenta para cortar ou esculpir partes do

⁵ A partir do uso integrado dos sistemas CAD e CAM – *Computer Aided Manufacturing* – é possível fabricar elementos diretamente a partir do computador.

edifício. Ainda de acordo com o autor, apesar de relativamente novos na arquitetura, processos CAD/CAM têm sido utilizados na engenharia e desenho industrial por mais de 50 anos no desenvolvimento e na fabricação de carros, aviões ou pequenos produtos de consumo.

Na arquitetura, Pupo (2009, p.9) sugere um termo mais amplo, a materialização digital, que envolve a criação da forma através de máquinas associadas a computadores, de maneira global. Dentro da materialização digital, enquadram-se outros dois termos: a prototipagem e a fabricação digital. A primeira, com a função de auxiliar o projetista no ato da concepção, através da criação de modelos em escala reduzida ou de protótipos de partes do edifício em escala 1:1; e a segunda, com o propósito de fabricar peças finais ou formas do edifício por meio de processos automatizados.

Figura 16- Definições da materialização digital.

PROTOTIPAGEM DIGITAL	FABRICAÇÃO DIGITAL
Prototipagem rápida (Sólido, Líquido, Pó, Lâmina, Corte a Laser) <i>Milling</i> Corte em Vinil	<i>File-to-factory</i> <i>Metal Bending</i> <i>Tube bending</i> CNC
PRODUTOS	
Maquetes; Protótipos em escala (1:1)	Fôrmas; Peças finais

Fonte: Adaptado de Pupo (2009, p.9).

A crescente proliferação de computadores e *softwares* CAD de modelagem avançada possibilitou, a arquitetos e estudantes de arquitetura, a produção de projetos que seriam muito difíceis de desenvolver utilizando métodos tradicionais. Dunn (2012, p.6) destaca, em particular:

...a ascendência de novos *softwares* de modelagem computacional, que permitem sistemas paramétricos e organizações biológicas complexas serem geradas e exploradas, possibilitando uma produção arquitetônica mais holística e manufatura detalhada de componentes do edifício (*Op. cit.*, 2012, p.6).

Para partir do projeto para a construção, integrando os sistemas CAD/CAM à fabricação digital, Iwamoto (2009, p.7) defende que:

...é necessário transformar dados gráficos de desenhos bidimensionais e modelos tridimensionais para dados digitais, que uma máquina CNC possa entender. Isso demanda que os arquitetos essencialmente aprendam uma nova linguagem.

Muitos aspectos dessa mudança são relativamente automáticos e envolvem o uso de programas específicos da máquina (*Op. cit.*, 2009, p.7).

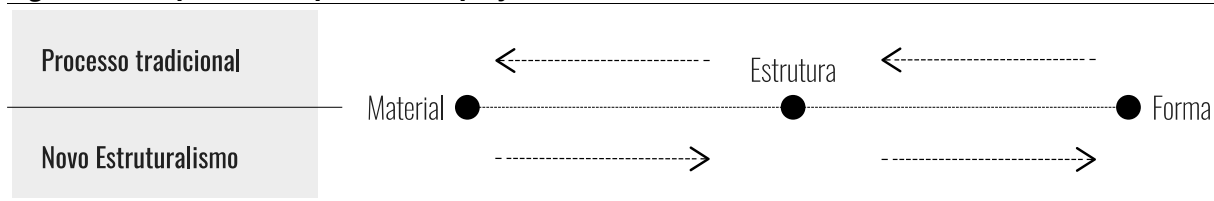
Com a inclusão de variáveis de fabricação digital na concepção arquitetônica, a inserção de parâmetros de materialização e produção passa a ser um requisito necessário, que pode alimentar o projeto de vários modos (KLINGER, 2008, p.27). O autor destaca fatores como a consideração das restrições operativas das máquinas, as soluções de detalhes customizados, os critérios de tolerância, os limites ferramentais (como a influência da espessura de uma broca no ajuste final), bem como em complexidades envolvendo a mudança do modelo em escala reduzida para o modelo em escala natural. Apesar da digitalização do processo construtivo contemporâneo, cabe registrar que “o detalhamento arquitetônico, técnica emblemática do arquiteto de colocar sua arte nos edifícios, continua a ser um produto da relação do projeto com a indústria”. (MARBLE, 2012, p.9).

Em entrevista concedida a Celani, Neto e Franco (2015, p.3), um dos sócios da empresa *Design-to-Fabrication*, o arquiteto Peter Mehrrens, reitera o valor da presença do arquiteto na indústria de fabricação digital, uma vez que “a complexidade da envoltória de edifícios de formas livres requer o conhecimento em **projeto generativo e detalhamento construtivo** (*grifo nosso*), e muitas vezes os arquitetos que concebem não têm essa combinação em seus escritórios”.

Além das questões gerais que envolvem a fabricação de partes do edifício, “fatores de montagem como a etiquetagem/numeração das peças, codificação de barras e limitações de tamanho para o transporte também passam a ser importantes, revelando informações que podem afetar o projeto final” (KLINGER, 2008, p.28).

Dada a complexidade de materialização no processo de projeto paramétrico em Arquitetura, Oxman e Oxman (2010, p.17) defendem, em seu manifesto *The New Structuralism* (O Novo Estruturalismo), que esse processo de preparação para fabricação e construção depende de uma reinterpretação da tectônica do projeto.

Os autores (*Op. Cit.*, 2010, p.17) constataam que nos processos de projeto tradicionais os projetistas seguem a sequência de definir primeiro a forma, depois a estrutura, e por fim o material. No novo estruturalismo, porém, os Oxman propõem que essa ordem seja invertida, estando a concepção baseada na sequência material-estrutura-forma (Figura 17).

Figura 17 – Sequências do processo de projeto tradicional e do Novo Estruturalismo.

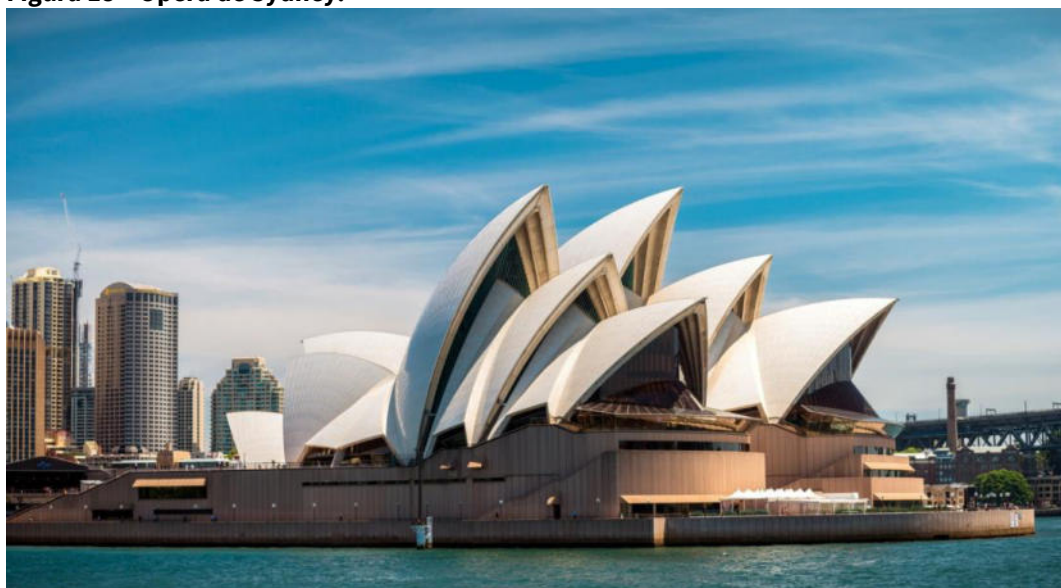
Fonte: Elaboração própria a partir de Oxman e Oxman (2010, p.17).

Sem a incorporação de tais recursos computacionais ao contexto profissional atual, a materialização de modelos digitais seria uma tarefa longe de ser realizada, pelo menos quando se trata de projetos ditos fora do convencional (SCHEURER, 2010, p.89). Iwamoto (2009, p.4) corrobora com o autor quando afirma que:

...fabricação digital, em particular, tem causado uma revolução projetual, impulsionando uma grande tendência inventiva e inovadora em arquitetura. A inevitável separação que arquitetos encontram entre o desenho, como meio de representação, e o edifício, o resultado final de seu trabalho. Práticas digitais tem o potencial de estreitar o caminho entre representação e edifício, oferecendo uma conexão hipoteticamente perfeita entre projeto e execução (*Op. cit.*, 2009, p.4).

Decisões de qual máquina ou método deve ser usado para se conectar à intenção projetual e à capacidade da máquina escolhida para realizar a fabricação digital do elemento que se deseja. A autora indica a necessidade de que arquitetos engajados com a tecnologia digital entendam como essas ferramentas funcionam, que materiais são mais adequados e onde as ferramentas se encaixam às possibilidades de projeto.

Quando se trata da fabricação de partes que compõem o todo em um edifício de formas complexas, Dieste (1992, pp.186-203) menciona a aplicação da racionalização geométrica (modo de simplificar a forma do projeto para a sua construção) como uma **necessidade econômica** (*grifo nosso*). Ela também é, por consequência, aspecto de construtibilidade do edifício que tem forte interferência no processo de projeto, seja nas fases iniciais, ou em fases mais avançadas. O autor traz o exemplo da obra da Ópera de Sidney, que fez com que o arquiteto Utzon alterasse a superfície de forma livre do projeto, para que houvesse possibilidade de fabricação, geometricamente e economicamente viável, em uma clara demonstração da história recente de processo de racionalização que ocorreu subsequente às fases iniciais de criação da forma do edifício.

Figura 18 – Ópera de Sydney.

Fonte: Walsh (2019, p. 1, fig. 1).

Apesar de a racionalização geométrica avançada ter feito parte da arquitetura não tradicional por mais de um século, nas últimas duas décadas, a prática se intensificou devido a avanços na tecnologia de modelagem digital, segundo Fischer (2012, p.25). Em tempos de uso de recursos computacionais no projeto, a racionalização geométrica tem que reavaliar a geometria com um desvio mínimo em relação ao projeto original e, ao mesmo tempo, encontrar requisitos para os tipos de painel, a suavização de superfície, a paginação dos painéis e o custo de produção Shelden (2002, p.26). Pottman (2010, p.74) constata, em seu estudo, que “ainda não há estágio de sofisticação suficiente a ponto de disponibilizar *softwares* com a capacidade de fazer o trabalho de racionalização de geometria; é necessário introduzir um tipo de fase de redesenho após a definição da geometria original”.

Em casos da prática profissional, o arquiteto Marc Simmons explica, em entrevista concedida a Celani (2018, p. 3) que quando começa a trabalhar na racionalização de uma determinada geometria em momentos mais precoces, pode verificar com precisão se a forma proposta é viável. Para ele, isso é importante, “porque muitas vezes esses tipos de análise precipitam um novo design ou uma mudança no orçamento, no início do projeto. Porque quando você tem uma explosão mais tarde no projeto, é sempre um pesadelo.”

Nesse sentido, é cada vez mais comum, na década de 2000 e até meados da década de 2010, a integração de empresas especializadas na fabricação de formas complexas,

como mencionam Celani e Lenz (2014, p. 143). Essas empresas podem iniciar a sua colaboração nas fases iniciais do projeto, ou em fase posterior, de viabilização do projeto para ser construído, conforme o exemplo do Centre Pompidou, da cidade de Metz, na França (Figura 19).

De modo mais amplo, na fase de projeto, a racionalização geométrica aliada à outras variáveis são de grande importância, pois “esses princípios podem introduzir o mecanismo generativo no projeto paramétrico, que é capaz de produzir dimensões otimizadas para partes do edifício e simplificar as suas inter-relações” (BANIHASHEMI; TABADKANI; HOSSEINI, 2017, p.1).

Figura 19 – Centro Pompidou Metz.



Fonte: De La Tour (2010, p. 3, fig. 2).

Segundo Wong *et al.* (2006, p. 81), “a construtibilidade dialoga com sistemas de gerenciamento de projeto que usam conhecimento construtivo otimizado e experiência para potencializar o resultado da obra”. Para ele, os benefícios vêm quando a construtibilidade é considerada nos estágios mais precoces de projeto. Quanto ao impacto da construtibilidade na etapa de projeto, Shelden (2002, p.47), destaca que:

...à medida que o processo projetual está em vias de considerar aspectos de construtibilidade, as relações entre os elementos físicos e digitais ganham novas formas. A integração vem menos preocupada com as capacidades de captura da forma das representações digitais, e mais engajada em entender questões de

construtibilidade. Nesse sentido, o uso de protótipos físicos em escala natural, os chamados *mock-ups*, com os sistemas do edifício produzidos por fabricação digital, promovem informações valiosas para o desenvolvimento do projeto (*Op. cit.*, 2002, p.47).

O termo ***mock-up*** refere-se a **protótipos que simulam um recorte do ambiente construído futuro, para auxiliar na tomada de decisões projetuais**, e é extremamente recorrente em projetos customizados, sobretudo os que adotam soluções inovadoras. Scheer (2014, p.34) descreve-o como a simulação de um ambiente que cria uma experiência artificial, que pode ser criada com materiais do edifício.

O arquiteto Marc Simmons, em entrevista concedida a Celani (2018, p.3), relata que as soluções adotadas na sua empresa de consultoria envolvem rotineiramente a criação de *mock-ups*. Outro arquiteto, Peter Mehrrens, que atua ao mesmo tempo na empresa de fabricação digital BEMO Systems, e é sócio da *Design-to-Fabrication*, relata que para esclarecer detalhamentos/pormenorizações por vezes criam *mock-ups*.

Ampliando a discussão para o uso dos modos de representação em função da construção, Mangelsdorf (2010, p.41) introduz o meio digital e as tecnologias emergentes como rápidos expansores do que se pensa acerca de forma, espaço e possibilidade de materialidade. Seguindo esse raciocínio, as estratégias de projeto requeridas para essa maneira inteligente de pensar o projeto envolvem o **comportamento estrutural de formas complexas desde as fases iniciais** e apontam para uma coordenação entre **estrutura, arquitetura e fabricação** (*grifos nossos*).

Muitos autores defendem a colaboração estreita entre **arquitetos, engenheiros estruturais e empresas de construção, ou da indústria de fabricação digital**. Assumindo essa condição, Oxman e Oxman (2010, p.23) constataam que “arquiteto e engenheiro civil dividem novamente a histórica responsabilidade no processo de projeto, fabricação e construção”. Desse modo, **tectônica digital, morfogênese digital, materialidade e geração evolutiva** (*grifo nosso*) são, segundo os autores, o campo de pesquisa do projeto de engenharia estrutural que também é comum ao arquiteto. Assim, a engenharia estrutural, a codificação e a fabricação de sistemas construtivos têm se tornado uma área

de estudo de projeto e expandido a base de conhecimento comum ao arquiteto e ao engenheiro estrutural.

A literatura aponta, também, uma aproximação do que vem sendo produzido no design paramétrico com a produção artesanal, dadas as suas características únicas. Gramazio e Kohler (2008c, p.180) apontam que tempos de produção arquitetônica digital, “nossa concepção de repetição em série, produto da industrialização, vem sendo transformada mais ou menos da mesma maneira em que foi a singularidade da produção artesanal”. Scheer (2014, p.5) afirma que o conceito da produção artesanal “é essencial para o trabalho do arquiteto”.

Dada a usual customização da forma e a complexidade geométrica, os projetos paramétricos frequentemente tomam partido da fabricação de partes do edifício fora do canteiro/estaleiro de obras, seja por meio de fabricação digital ou analógica. Isso traz para o processo de projeto uma variável importante: a montagem. Isto porque muitos projetos são executados fora do canteiro/estaleiro de obras, com a pré-fabricação. Kula *et al* (2014, s.n) afirmam que, independentemente do material que se aplique a um projeto, vários métodos de montagem podem ser aplicados. Para cada um deles, são necessários conhecimento e técnicas específicas, tanto por parte da equipe de projeto, quanto pela de construção.

A separação entre projeto e construção contrasta fortemente com tendências atuais no modo de fabricação digital, projeto paramétrico e fabricação, em muitas escolas de arquitetura inovadoras, empresas e projetos (BERNSTEIN, 2008, p.63).

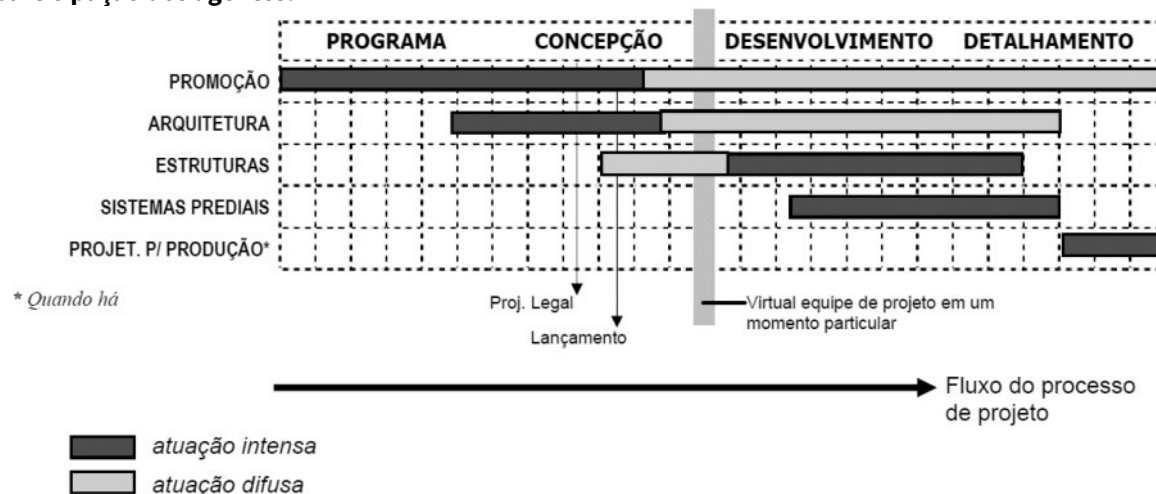
Toda a especificidade que envolve a construção e fabricação do projeto paramétrico exige, como já indicado anteriormente neste capítulo, a contribuição de diversos participantes. Os papéis tradicionais de projetistas e empreiteiros são desconstruídos e subsequentemente refinados, como aponta Bernstein (2008, p.62). Isso leva à necessidade de construção de referencial teórico relativo ao projeto colaborativo na era dos recursos computacionais, apresentado a seguir.

1.3 Projeto Colaborativo na era dos recursos computacionais

Projetar edificações mais complexas pode envolver uma gama de outros profissionais ainda mais especializados que o usual (LAWSON, 2011, p.221). Nesse contexto de complexidade, Fabrício (2007, p.47) indica a necessidade de aliar competências especializadas, com capacidade para gerar soluções coordenadas e harmônicas.

O contexto da indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) indica que os processos sequenciais de integração entre disciplinas, como o indicado por Fabricio e Melhado (2001, p.1), são problemáticos. Para os autores, o momento em que ocorre o trabalho “virtual” em equipe é apenas um: entre a concepção e o desenvolvimento.

Figura 20 - Esquema genérico de um processo sequencial de desenvolvimento do projeto de edifícios - participação dos agentes.



Fonte: Fabricio e Melhado (2001, p.1).

Nesse modelo, “as decisões acabam sendo hierárquicas entre os profissionais, com um único líder assumindo a responsabilidade de coordenar o desenvolvimento do processo e compatibilizar os projetos” (FLORIO, 2007, p.4). Para o autor, “esse processo centralizado acarreta o risco tanto de diminuir o desempenho do produto como de reduzir possíveis contribuições e compromissos dos outros participantes” (FLORIO, 2007, p.4).

Assim, “**Projeto colaborativo** é o processo no qual atores de diferentes disciplinas compartilham seu conhecimento tanto sobre processo de projeto quanto sobre conteúdo de projeto” (KLEINSMANN, 2006, p.249, *grifo nosso*). Segundo a autora deste conceito de projeto colaborativo, eles fazem isso “para criar uma compreensão compartilhada de

ambos os aspectos, para serem capazes de integrar e explorar os seus conhecimentos e alcançar um objetivo comum maior: o novo produto a ser projetado” (p.249).

A literatura aponta que o projeto em equipe se enquadra basicamente em duas classificações: **colaboração** e **cooperação**. Kvan (2000, p. 410) corrobora com Kleinsmann (2006, p.249) quando define que colaboração significa “trabalhar com outros compartilhando objetivos comuns a uma equipe que, através deles, tenta encontrar soluções satisfatórias para todos os envolvidos”. A cooperação, segundo o autor, envolve planejamento e divisão de atribuições, e a autoridade ainda fica a cargo de um indivíduo e não da equipe, como no caso da colaboração. A colaboração projetual requer um alto senso de trabalho em equipe para alcançar um resultado criativo, ao contrário da cooperação projetual. Mas para que este resultado seja alcançado, é necessário um alto nível de compromisso dos participantes durante o processo. Laing (2019, s.n) afirma que a colaboração em projetos “exige o desenvolvimento de novas técnicas” por parte das equipes envolvidas, e que a atividade colaborativa exige prática. O autor reforça que, esses requisitos são ainda mais significativos quando práticas colaborativas envolvem a introdução de novas ferramentas digitais.

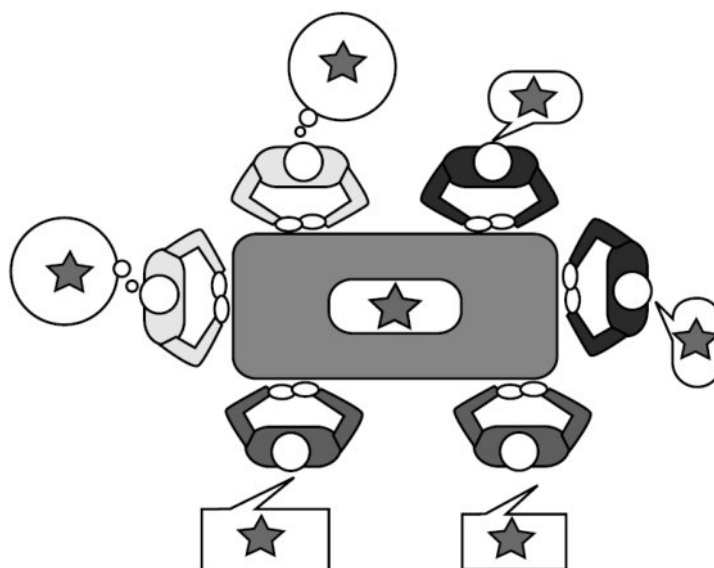
Durante o processo de projeto colaborativo, é importante para os atores que tenham um entendimento compartilhado acerca do projeto que estão fazendo (Figura 15) e isso interfere diretamente na eficiência do mesmo (KLEINSMANN, 2006, p.62).

Ao mesmo tempo, esse entendimento compartilhado surge por meio da interação por proximidade física. Em experiência realizada com estudantes de mestrado, Kubicki e Guerriero (2009) indicam que, em ateliês de projeto à distância entre graduandos em arquitetura, engenharia civil e construção, há uma clara inclinação ao projeto cooperativo, assumindo que o projeto de arquitetura entre projetistas distantes remonta à divisão de tarefas e papéis e em decisões altamente compromissadas.

Em uma atividade colaborativa, a comunicação efetiva pode interferir significativamente no modo com o qual o processo é conduzido. Além dos perfis comportamentais de liderança, os meios utilizados nas discussões podem fazer a diferença. Os atores comunicam-se oralmente e através do uso de documentos textuais. Adicionalmente, desenhos e protótipos desempenham um importante papel no suporte a

conteúdos relacionados à comunicação projetual. A qualidade da comunicação projetual depende do processo de criação de um entendimento compartilhado. Não obstante, é necessário ter discernimento no processo de criação de entendimento compartilhado entre os atores envolvidos em um projeto colaborativo (KLEINSMANN, 2006, p.250). “O projeto e execução de um edifício são um esforço feito por muitas pessoas. Comunicação ao longo de todo o processo é um fator crucial, e costuma ser um gargalo” (ACHTEN, 2009, p.510).

Figura 21 – Atores tem um entendimento compartilhado do projeto.



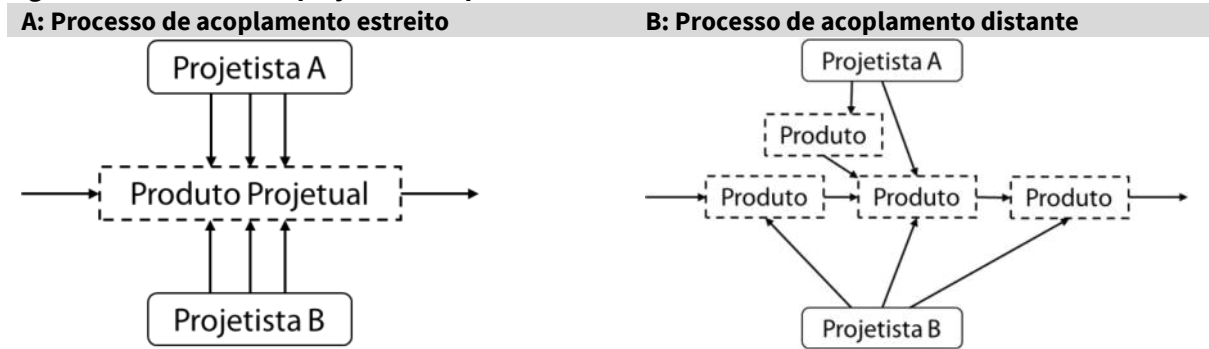
Fonte: Kleinsmann (2006, p. 62).

Projetar é, tipicamente, um processo de acoplamento estreito, mais conhecido como *close-coupled*, em que os participantes trabalham próximos para desenvolver um projeto (Figura 22-A). Nessa situação, não é possível identificar, no produto projetual, diferença de contribuição de um participante para outro (KVAN, 2000, p.411). Mas, segundo o autor, a maioria dos projetos é de acoplamento distante, ou *loosely-coupled* (Figura 22-B), quando cada participante contribui em diferentes domínios de *expertise* em momentos em que cada um deles tem o conhecimento apropriado para situações específicas.

Kvan (2000, p.411) indica que os projetistas atuam juntos devido à *expertise* específica que cada um pode levar ao processo de projeto. Assim, dois ou mais *experts* operam nos seus próprios domínios em um problema de projeto compartilhado, levando o projeto a se desenvolver em passos discretos. O autor constata que o projeto colaborativo consiste em ações paralelas de *experts*, cada uma de curta duração, pela atividade unificada de negociação e avaliação. Dessa maneira, projetar é, na verdade, um ato cooperativo por

natureza, e a colaboração ocorre quando da negociação e a avaliação, atividades observadas como essenciais, presentes em projetos colaborativos auxiliados por computador (KVAN, 2000, p.413).

Figura 22 – Processos de projeto de acoplamento estreito e distante.



Fonte: Adaptado de Kvan (2000, p.411).

Quando há o compartilhamento, por parte dos participantes, de algum conhecimento prévio e/ou experiência, “nós vemos o sucesso colaborativo, mostrando que indivíduos se desempenham melhor trabalhando com outra pessoa do mesmo nível de experiência do que trabalhando individualmente para resolver um problema desafiador” (NOKES-MALACH; MEADE; MORROW, 2012, p.54). Os autores destacam ainda que:

“(...) experts devem também se desempenhar melhor colaborativamente porque eles podem rapidamente identificar problemas e focar nas questões mais críticas da tarefa, dando a oportunidade para que processos construtivos e interativos criem um ambiente comum para uma tarefa que é suficientemente desafiadora” (NOKES-MALACH; MEADE; MORROW, 2012, p.52).

Diversos autores defendem modelos específicos para que a colaboração aconteça. Um deles, Achten (2002, p.8), indica a criação de ambientes propícios para que o projeto colaborativo possa acontecer, defendendo que devem estar presentes as seguintes condições:

- Os participantes devem desfrutar da interação;
- Cada participante deve atentar para a presença dos outros participantes;
- Os participantes devem se apresentar de várias maneiras;
- Fornecer meios para a resolução de conflitos, permitindo acesso flexível e aberto aos dados do projeto;

- Fornecer representações de informações e participantes que são específicos para o projeto colaborativo;
- Os participantes devem estar conscientes dos objetivos compartilhados do projeto;
- O ambiente projetual deve parecer mais um meio do que uma ferramenta.

Chiu (2002, p. 206) sugere graficamente, em seu modelo, como funciona o processo de projeto colaborativo. Esse modelo (Figura 23) é centrado na tomada de decisões, e mostra um ciclo de **consultoria, negociação, tomada de decisões e reflexão**. Antes dos atores alcançarem o estágio final, mais de um ciclo é necessário. “A participação ativa em um grupo de projetistas requer compromisso da parte do indivíduo e, por parte dos membros da equipe de projeto, requer comprometimento em fazer a colaboração funcionar” (LAING, 2019, s.n).

As novas competências de gerenciamento e liderança de equipes multidisciplinares serão mais importantes à medida que os empreendimentos forem mais complexos, devendo ser acrescidas aos conhecimentos “clássicos” dos projetistas e não substituí-los (FABRÍCIO; MELHADO; BERTEZINI, 2006). “O ideal de um processo colaborativo de projeto/construção/operação completamente integrado é usualmente alcançado em projetos complexos, de larga escala” (SCHEER, 2014, p.120). De acordo com o autor, a realidade atual indica que “muitas tarefas que eram executadas tradicionalmente por desenhos agora são feitas digitalmente” (*Op. cit.*, p.120).

Na formação de equipes – colaborativas, cooperativas ou não, o aparecimento de liderança é um processo espontâneo, dada a diversidade de personalidades envolvidas no processo. White (1996, p.167) fala da necessidade da compreensão de expectativas individuais e coletivas, e que pode haver risco para a colaboração quando ocorrer a dominância por um ou mais membros da equipe.

É comum observar que os “dois tipos de liderança se alternam durante o ciclo de vida do projeto, dependendo das circunstâncias” (MÜLLER *et al.*, 2018, p.83). “Liderança vertical (LV) é o processo interpessoal por meio do qual o gerente de projeto influencia a equipe e outros atores na condução do projeto” (MÜLLER *et al.*, 2018, p.84). A figura do líder

interfere especialmente durante os momentos de negociação. A escolha tipo de liderança é claramente definida pela personalidade do indivíduo (MÜLLER *et al.*, 2018, p.85).

Figura 23 – Modelo de processo de projeto colaborativo.



Fonte: Chiu (2002, p. 206).

Quanto à adequação dos tipos de liderança em contextos de projeto, Pearce (2004, p.48) indica que a liderança horizontal (LH) funciona melhor em situações caracterizadas por interdependência da equipe, criatividade e complexidade. Essas situações requerem uma interação intensa entre os participantes da equipe (PEARCE, 2004, p.48). O autor destaca ainda que, em situações de liderança compartilhada, ou horizontalizada, é o líder vertical que mantém continuamente a LH, pela manutenção da visão geral e direção, disparando a transição entre LV e LH através de perguntas de soluções à equipe, e gerenciando a pertinência na atribuição das lideranças.

A “LH”, também classificada como liderança centrada na equipe, “ocorre quando um ou vários membros da equipe de projeto influenciam o gerente de projeto e o resto da equipe, e potencialmente os demais colaboradores, a conduzir o projeto de um modo específico” (MÜLLER *et al.*, 2018, p.84). Em ambas as definições, no entanto, considera-se que haja a figura do gerente de projeto, aquele que de algum modo irá representar a equipe como líder, indicando que, por mais colaborativo que seja o processo, com alta alternância de LH, as equipes colaborativas terão sempre um representante. Mesmo para que aconteça a horizontalização da liderança, é importante a figura do líder vertical como descentralizador da liderança (MÜLLER *et al.*, 2018, p.85). A colaboração efetiva, comumente presente nos processos colaborativos e defendida por Kvan (2000, p. 413), ocorre em momentos que alternam entre cooperação e colaboração. De maneira

coincidente, podemos afirmar que os momentos de negociação e avaliação seriam onde aconteceria a liderança compartilhada, chamada de LH. Contudo, o líder vertical sempre estará presente, como mediador dos momentos de transição para a colaboração e para a cooperação.

O arranjo de colaboração em projetos de edifícios coloca arquitetos como profissionais com a percepção e informações necessárias para exercerem controle sobre o processo como nunca. Eles estão prontos para recolocar o projeto como o principal impulsionador, trazendo o arquiteto para um papel de liderança integrativa (BERNSTEIN, 2008, p.66).

Historicamente, com o surgimento das tecnologias digitais no projeto, “a colaboração possibilitou o compartilhamento de desenhos produzidos em sistemas digitais precursores (e-mail, imagens), mas a tecnologia dos anos 1990 não alcançou a possibilidade de compartilhamento de modelos, em que equipes colaboram em sua produção” (LAING, 2019, p.3). O autor destaca que a equipe de projeto “não tinha mecanismo (assistido por computador) para colaborar, e certamente nada que colocasse modelos computacionais no centro da colaboração”. O centro da colaboração acontecia com desenhos impressos, croquis ou fotografias do local (LAING, 2019, p.4).

Apesar de ser recorrente a dissociação entre a representação arquitetônica e a tectônica, a verdadeira novidade nos projetos contemporâneos é a integração íntima entre projeto e materialidade, o que pode desafiar as identidades profissionais tradicionais do arquiteto ou do engenheiro Picon (2010). O autor reforça, ainda, que ambas as profissões foram baseadas na suposição de uma distância entre o mundo intelectual e o mundo físico, uma distância que o projetista deveria atravessar.

Nos projetos que utilizam recursos computacionais (mas não exclusivamente para eles), uma troca efetiva de informações é fundamental para alcançar a construtibilidade arquitetônica, e é indicada por meio de uma colaboração próxima entre arquitetos, empreiteiros, fabricantes, fornecedores de materiais, engenheiros e muitos outros, nas fases iniciais e conceituais do projeto (KLINGER, 2008, p.27). Nesse mesmo sentido, Picon (2010), indica que o processo de projeto computacional deve envolver vários consultores,

desde os colaboradores do arquiteto até os engenheiros e construtores responsáveis pelos desenvolvimentos tecnológicos específicos.

Conceitos como BIM (*Building Information Modeling*), fabricação digitalmente controlada, CNC e sustentabilidade são evidências das mudanças dramáticas pelas quais a indústria vem passando na luta pela definição de integração (BERNSTEIN, 2008, p.62).

Florio (2007, p.4) sinaliza que os recentes avanços na tecnologia da informação e comunicação, bem como dos programas da plataforma BIM, têm incrementado o crescimento das experiências com os denominados projetos colaborativos, uma vez que “a interface e os métodos nos quais as equipes de projeto produzem, em um ambiente digital, são significativamente diferentes daqueles que geram ideias pelo uso da caneta e papel” (LAING, 2019, p.2).

“Embora as praticidades do BIM remontem à década de 1980, o seu uso na indústria da AEC remonta aos anos 2000” (LAING, 2019, p.3). “A colaboração por meio do BIM deveria promover as discussões mais profundas acerca da colaboração em geral, mas continuamos a retornar a debates não conclusivos que remontam à década de 1990” (LAING, 2019, s.n).

Ao considerar fundamental a integração (de uma equipe colaborativa de projeto) desde as fases iniciais, Othman (2011, p.333) considera que “integrar o conceito de construtibilidade durante o processo de projeto aumenta a performance do edifício, em termos de redução do tempo de obra, custos e desperdício, assim como aumenta a qualidade e a produtividade”.

Na abordagem integrada no projeto, de acordo com Sobek (2010, p.39), “dados da engenharia estrutural são alimentados de volta para o modelo e serve como um guia de projeto para a arquitetura ao invés de uma base para mera pós-racionalização da geometria do objeto arquitetônico”. Desse modo, o papel dos colaboradores varia por projeto, e na realidade, muitos colaboradores potenciais devem reconfigurar sua maneira de trabalhar para participar de modo mais efetivo da troca de informações digital (KLINGER, 2008, p. 27). “Transportar a informação da mente do projetista para o resultado materializado, de modo a criar um **fluxo de trabalho digital contínuo**, continua a ser um grande desafio” (SCHEURER, 2012, p.111, *grifo nosso*). O autor destaca que parte desse desafio é provocado

devido à “variedade de padrões de incompatibilidade entre *hardware* e *software* disponíveis” (*Ibidem*).

Ao projetarem formas arquitetônicas complexas, “os arquitetos têm duas tarefas: 1) especificar as técnicas construtivas e 2) persuadir outros a validarem as formas que propõem” (SCHEER, 2014, p.92). “Os principais escritórios de arquitetura do mundo estão criando, desde o início dos anos 2000, grupos interdisciplinares que cuidam especificamente das questões de geometria avançada e fabricação digital”. Os autores indicam que esses grupos “são compostos por matemáticos, cientistas da computação, engenheiros e arquitetos” (CELANI; LENZ, 2014, p.142).

Essa avaliação das formas complexas propostas envolve, segundo Celani e Lenz (2014, p.143), a recursão a três diferentes estratégias: 1) soluções *in-house*: composição, dentro do próprio escritório, de grupos especiais de projeto e/ou de modelagem, formados por programadores, matemáticos, arquitetos e engenheiros; 2) contratação de consultores especializados, que trabalham como uma equipe integrada aos autores principais do projeto, como a empresa *Front Façade Consultants*; ou 3) serviços oferecidos pela indústria, quando empresas especializadas auxiliam no projeto e realizam a fabricação, como a *Design-to-Production*, a A. Zahner.

Celani e Lenz (2014, p.142) reforçam ainda que:

com a adoção, cada vez mais comum, de estruturas com formas livres e não repetitivas, uma das principais tarefas desse tipo de equipe é criar algoritmos que geram detalhes específicos para cada região de um edifício, diminuindo o trabalho braçal e, sobretudo, eliminando as chances de ocorrerem erros (*Op. cit.*)

O trabalho da *Design-to-Production* é, de acordo com Arnold Walz (sócio da empresa), “auxiliar a produzir essas estruturas complexas de duas maneiras. A primeira etapa é dar suporte na fase inicial do projeto; nós escrevemos códigos para criar as formas.” O arquiteto menciona, em entrevista a Sedrez; Celani (2014, p. 2) que:

“a etapa seguinte é quando o projeto parece estar pronto e a equipe concorda com o resultado, mas você chega ao momento de incorporar todos os aspectos de engenharia estrutural, aspectos físicos do edifício. Esses aspectos também causam mudanças que devem ser manejadas. Nestes edifícios complexos uma pequena mudança pode ter uma reação em cadeia por todo o projeto”

Os autores citam peculiaridades em cada uma das três estratégias aplicadas. Para as soluções *in-house*, que tem tendido a desaparecer, eles destacam o alto custo de sua manutenção, pois nem todos os projetos dos escritórios precisam desse tipo de equipe. Nas consultorias independentes, os autores destacam a vantagem da “neutralidade em relação aos processos de produção”, uma vez que o orçamento da fabricação é dado por outra empresa. No caso dos serviços oferecidos pela indústria especializada, vislumbra-se como vantagem a integração estreita com o processo produtivo. Conclusivamente, Celani e Lenz (2014, p.150) advogam que:

“...qualquer que seja a solução adotada para a integração entre arquitetura e fabricação digital (*in-house, oferecida pela indústria ou consultoria especializada*), é importante ressaltar que os resultados sempre são melhores quando existir, efetivamente, uma integração desses especialistas com o processo criativo de projeto, desde suas etapas iniciais (*Op. cit.*).

Na empresa *Design-to-Production*, por exemplo, existem duas maneiras diferentes para auxiliar a produzir estruturas complexas. Arnold Walz relata, em entrevista concedida a Sedrez; Celani (2014, p. 2), que a primeira é auxiliar na fase inicial de projeto, guiando a construtibilidade do edifício. A segunda, é quando o projeto parece estar pronto e é preciso incorporar os aspectos de engenharia estrutural, aspectos físicos do edifício. Segundo os autores, consultores geralmente têm que conduzir até certo ponto, então outros profissionais assumem o detalhamento.

Klinger (2008, p.29) defende que seja adotado um conjunto de estratégias/habilidades para o processo de projetar através da construção, considerando a construtibilidade do edifício, que envolvem:

Consultoria/colaboração: todas as disciplinas têm algo a oferecer como dado de entrada no pensamento projetual, dependendo das condições do problema de projeto. Entretanto, outros tipos de conhecimento são crescentemente relevantes para a equação, como ciências biológicas, condições ambientais, gerenciamento de informações e outros.

Fabricação: *experts* bem-informados em processos de fabricação digital e equipados com um entendimento do saber projetual são essenciais;

Software e codificação: domínio de programas computacionais e codificação para a resolução aplicada a problemas que os *softwares* tradicionalmente não conseguem responder.

Pesquisa: pesquisa direta relacionada a problemas considerados essenciais no processo de projeto. Considerando que muitas empresas não têm tempo nem recursos para investir em pesquisa e desenvolvimento, potenciais parcerias que transgridam os limites tradicionais entre academia e indústria são importantes (KLINGER, 2008, p.29).

O projeto computacional traz consigo mudanças no modo de fazer arquitetura, sobretudo na inclusão da **pesquisa** como parte integrante do fazer do arquiteto. Para Hensel e Nilsson (2019, p.6), a prática arquitetônica tem evoluído, “deixando de ser objeto de pesquisa para se transformar um método de pesquisa propriamente dito; deixando de ser uma atividade observada à distância por pesquisadores para ser uma prática epistemológica”. Os autores ressaltam que “a forte integração entre pesquisa e prática projetual requer uma abordagem aberta e colaboração ágil entre instituições de pesquisa (universidades, institutos, etc.), escritórios de arquitetura e pesquisador(es)” (*Op. cit.*, p.12).

Para Bernstein (2008, pp.62-63), os modelos de projeto da atualidade não funcionam como um ambiente onde as informações digitais criadas colaborativamente são a base para a construção e fabricação. Segundo ele, esse obstáculo conceitual irá requerer cooperação entre profissionais da arquitetura, engenharia e construção e cliente. Para isso, Sedrez e Gauss (2010, p.162) defendem que uma das saídas para isso é o ensino para arquitetos e engenheiros. Os autores acreditam que é preciso abordar dois aspectos durante a formação dos dois profissionais: as habilidades de programação e a automação da construção, para preencher as lacunas entre o projeto e a fabricação.

Diante da necessidade de troca de informações fluida, outro fato que alguns autores destacam são os arranjos contratuais atuais da indústria da construção civil, que devem evoluir mais rapidamente para facilitar a troca de informações ao longo de todas as fases do processo, como defende Klinger (2008, p.28). Desse modo, a lógica dos fluxos de trabalho digitais na arquitetura começam a estruturar o modo no qual arquitetos projetam, empreiteiros constroem, e a indústria se reorganiza (MARBLE, 2012, p.8). Isso leva a uma situação em que “a gama de *expertise* requerida para incorporar informações para o

projeto, fabricação e construção de novos edifícios tem levado à criação de equipes grandes, multidisciplinares e altamente especializadas”, que por consequência, “requer novos modelos organizacionais” (MARBLE, 2012, p.10). Assim, o autor destaca que o novo papel dos arquitetos de simplesmente gerenciar uma equipe de especialistas progride para redefinir o papel desses especialistas em um sistema de projeto e produção.

Bernstein (2008, p.62) corrobora com esse raciocínio, quando afirma que as práticas integradas sugerem que a indústria da construção civil deve se mover dos modos tradicionais de trabalho para equipes totalmente colaborativas, o que inclui todas as especialidades no ciclo de vida de um projeto.

Em realidades de edifícios projetados parametricamente e que utilizam tecnologias de fabricação de ponta em grande escala, Bernstein (2008, p.64) aponta que “alterações no projeto antecipadas por uma fabricação baseada no modelo, para ser usado na construção, incluem os seguintes desafios no processo de formação das equipes de projeto”:

- 1) **Conhecimento.** Quais os tipos de conhecimentos que são requeridos para os projetistas que “pré-fabricam” o edifício digitalmente antes de sua efetiva construção?
- 2) **Escopo.** Quais são as tarefas resultantes e as possibilidades de um processo em mudança? e como ele redefine os papéis normativos desempenhados por cada participante?
- 3) **Risco.** Projetistas e construtores estão submetidos à responsabilização pelo produto entregue perante futuros processos judiciais.
- 4) **Recompensa.** Ao invés de buscar finalizar o projeto ao mais baixo custo possível, os clientes considerariam novas taxas de risco/recompensa que trariam resultados bons ou excelentes?
- 5) **Estrutura.** Assumindo que não é possível para os arquitetos projetistas trazerem o conhecimento pleno em materialidade para os seus processos de projeto, onde esse conhecimento deve ser inserido? O clássico arranjo arquiteto/construtor/proprietário vem sendo constantemente questionado.

- 6) **Propriedade intelectual.** A certificação profissional se tornou menos significativa quando o arquiteto e o construtor colaboraram para criar um modelo digital que é a base para a fabricação e construção.
- 7) **Educação.** Como os jovens arquitetos estão sendo treinados para essa crescente e grande “pegada” da multidisciplinaridade do projeto? (BERNSTEIN, 2008, p.64).

Para Laing (2019, p.5), a “prática colaborativa poderia ser facilitada através da formação educacional (prática educacional transdisciplinar)”. Contudo, o último dos desafios citados por Bernstein (2008, p.64), o da educação, evolve não apenas a questão da multidisciplinaridade. Celani (2018, p.5) reflete sobre “a importância de se ter profissionais ativos e com experiência prática participando da formação de jovens arquitetos”. Entretanto, a autora destaca que:

“a participação desse tipo de profissional na formação de estudantes de graduação está se tornando cada vez mais difícil nas universidades públicas (em particular no Brasil), devido à falta de flexibilidade para contratação de instrutores e à priorização da contratação de instrutores em período integral” (*Ibidem*).

Duarte *et al* (2012, p.391) apresentam o impacto da introdução de novas tecnologias (prototipagem rápida, animação, sistemas generativos, etc.) no currículo dos cursos de arquitetura, com o objetivo de promover o pensamento criativo no projeto.

A introdução dessas novas tecnologias depende de **iniciativas educacionais multidisciplinares e integradas**. Romcy (2017, p.266) aponta para a “impossibilidade de se aplicar em uma única disciplina/curso todo o percurso necessário para uma apropriação efetiva da abordagem paramétrica no ensino de projeto, além da necessidade de uma visão integrada entre as diferentes Áreas de Conhecimento”. Abordagens educacionais colaborativas multidisciplinares realizadas em instituições de ensino superior de determinados países possibilitam a percepção da relação entre diferentes departamentos de ensino e da indústria, como a de Nicknam *et al.* (2013, pp.595-604).

Ainda no contexto educacional e colaborativo em arquitetura, Marc Simmons, em entrevista concedida a Celani (2018, p. 2), cita “a importância dos ateliês multi-escalares para a arquitetura contemporânea: começando com uma situação de design urbano,

passando para o edifício, e basicamente detalhando tudo em uma escala de um para um”.

Para ele, é assim que

“...os alunos realmente entendem que o detalhamento de um para um e a seleção de material e a escolha da tecnologia são absolutamente necessários ao conjunto de considerações e valores de projeto que estão sendo implantados nas escalas urbana e arquitetônica” (*Op. cit.*).

Criação de conhecimento e integração são o principal objetivo do processo de projeto colaborativo (KLEINSMANN, 2006, p.250). Os contextos de projetos colaborativos recentemente têm feito emergir uma “revisão das questões relativas à autoria individual que, em uma sociedade informatizada e complexa, mostra-se cada vez mais anacrônica diante da velocidade e intensidade de troca de informação e colaboração” (FABRÍCIO, 2007, p.22). Assim, “o papel histórico do projeto como um autor, um criador solitário, está sendo substituído por fluxos de projeto conduzidos por algoritmos profundamente ligado a uma infraestrutura de comunicação digital coletiva” (MARBLE, 2012, p.8).

O contexto do projeto computacional indica que, progressivamente, “os projetistas trabalham colaborativamente com pessoas de sua própria disciplina e com especialistas de outros campos do conhecimento” (GU; OSTWALD, 2012, p.416). Os autores apontam que essa mudança “tem trazido problemas de trabalho coletivo, negociação e autoria compartilhada do conhecimento na frente do processo de projeto”. Como resultado disso, eles argumentam que “o projeto colaborativo tem se tornado um tópico de pesquisa especialmente importante para o setor de projeto e construção, enquanto a colaboração multidisciplinar é a norma da prática atual da AEC” (*Ibidem*).

A opinião de arquitetos da prática, ligados a consultorias especializadas, indica como as questões ligadas à autoria são cada vez mais de ordem coletiva. Marc Simmons, *professor of practice* do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), em entrevista concedida a Celani (2018, p.3), expressa o desejo de que “a autoria na arquitetura fosse creditada como na indústria cinematográfica, com listas exaustivas de centenas ou milhares de pessoas no final do filme; cada prédio deveria ser assim”. O arquiteto Arnold Walz, sócio da empresa *Design-to-Production*, em entrevista dada a Sedrez e Celani (2014, p.1), afirma que a maioria dos arquitetos nunca terá sua contribuição para o projeto

reconhecida. Segundo ele, isto trouxe “uma interessante discussão sobre o fim do conceito moderno de autoria, sendo o arquiteto membro de uma equipe cada vez maior de especialistas”.

Na prática, experiências recentes, como a de Ovídio *et al* (2019, p.12), indicam que “muitos desafios ainda precisam ser superados para a colaboração efetiva, que inclui o gerenciamento do processo projetual desde as etapas iniciais, a exemplo do entendimento da necessidade de realizar encontros constantes para se discutir os temas” de acordo com uma diversidade de pontos de vista dos envolvidos no projeto colaborativo.

1.4 Considerações sobre o capítulo

No primeiro tópico abordado, que discorre sobre o processo de projeto paramétrico, foram colocadas as condições gerais do processo de projeto em arquitetura, pelos principais autores (ANDRADE *et al.*, 2011; KOWALTOWSKI *et al.*, 2011; LAWSON, 2011) que tratam do tema. Foi destacada, por exemplo, a importância do entendimento das etapas pelas quais os projetistas passam durante o processo criativo: análise, síntese e avaliação. O destaque fica para uma característica consensual da atividade de projetar: as etapas mencionadas são acíclicas durante a projeção e podem ocorrer diversas vezes, de modo dinâmico, a depender do problema de projeto posto aos atores envolvidos.

Ainda sobre a atividade de projetar com restrições, destaca-se a compreensão do papel das restrições projetuais de Lawson (2011, pp.103-104) durante a projeção. Mais especificamente, o entendimento das características conceituais peça-chave para esta tese.

A complexidade de determinados processos de projeto exige, de acordo com os autores citados neste capítulo, uma combinação de condições variadas. Em todas elas, porém, há em comum a recomendação do trabalho colaborativo multidisciplinar, destacando o papel da diversidade de *expertise* como fator mais impactante de possíveis resultados dos processos de projeto complexos, em especial aos que utilizam recursos computacionais. Neste ponto destaca-se mais especificamente, a peculiaridade do projeto paramétrico em comparação ao projeto computacional tradicional (OXMAN; GU, 2015, p.478).

As condições colocadas na literatura para o projeto paramétrico indicaram as melhores conjunturas metodológicas para os experimentos de projeto realizados no âmbito desta pesquisa/investigação. Elas indicaram, por exemplo, que deve haver uma etapa inicial em que sejam investidos tempo e dedicação pelos projetistas na adaptação às ferramentas, dada a complexidade do meio paramétrico, seguidas de atividades de planejamento e implementação do “novo” modo de projetar.

Historicamente, a relação entre o **meio computacional** e a **construtibilidade** dos edifícios da arquitetura contemporânea passou por fases distintas. No final dos anos 1990 início dos anos 2000, com o surgimento de projetos de geometria complexa de arquitetos como Frank Gehry, Lynn e Kelly (1999) lançam o termo arquitetura *blob*, que por algum tempo esteve associada a projetos mirabolantes, de difícil execução e pouca viabilidade. Nesse mesmo período, a tese de doutorado de Shelden (2002) expõe os desafios para a construtibilidade da arquitetura de Frank Gehry, apontando o processo e técnicas utilizadas pelo escritório para viabilizar a construção de superfícies irregulares.

Picon (2004) escreveu que projetos desenvolvidos no computador tendiam a flutuar, indicando que na época, havia pouca preocupação com a dimensão material e construtiva. Mais adiante, no final dos anos 2000 e início dos anos 2010, a literatura aponta que o uso do computador começa a se integrar com o meio material de maneira mais efetiva, e surgem conceitos como materialidade digital na arquitetura (GRAMAZIO e KOHLER, 2008c) e o manifesto do novo estruturalismo (OXMAN e OXMAN, 2010). Essa integração culmina com o estado atual, em que o processo produtivo está, de uma maneira ou de outra, integrado ao projeto contemporâneo (MENGES, 2011).

Por fim, o item que tratou do processo de projeto paramétrico destacou o papel das competências multimeios e multidomínios como um dos requisitos do processo de projeto, utilizados como critério de observação nas futuras análises dos resultados desta tese. Diversos autores (GRAMAZIO e KOHLER, 2008c; LAING, 2019; SCHEER, 2014) alinham-se ao destacar a importância do desenho e de outros meios analógicos enquanto ferramentas que devem integrar-se aos fluxos digitais, inclusive em projetos da era digital.

O entendimento do que a literatura aborda acerca de materialidade e construtibilidade foi inicialmente significativo para delinear os limites do conceito de

construtibilidade. Destaca-se aqui, no conceito de materialidade, a materialidade digital da arquitetura, de Gramazio e Kohler (2008b, p.9). Apesar da diversa quantidade de conceitos de construtibilidade trazidos por inúmeros autores, decidiu-se aplicar a esta tese uma conceituação própria, a partir de outras definições presentes na literatura. Quanto à fase e requisitos de adoção, escolheu-se, especificamente, a fase de projeto, denominada por Kifokeris e Xenidis (2017, p.5) como fase de iniciação.

Além do conceito de construtibilidade, conhecer o panorama internacional de pesquisa e prática de projetos paramétricos trouxe o entendimento mais profundo da problemática inerente aos desafios do fazer arquitetônico em projetos que fogem à tradicionalidade. Serviu também para destacar o peso das questões técnicas e multidisciplinares representadas, sobretudo, pela integração entre estrutura, arquitetura e fabricação, como destacado por Mangelsdorf (2010, p.41). Essa discussão culmina no manifesto lançado pelos autores Oxman e Oxman (2010, p.17), que defendem o Novo Estruturalismo como uma maneira de integrar estrutura, tectônica digital, materialização, produção e pesquisa. Desse modo, este tópico direcionou para o levantamento da teoria que envolve o trabalho de equipes colaborativas nos processos de projeto paramétricos, tidos como de execução desafiadora.

O tópico relativo ao projeto colaborativo na era dos recursos computacionais possibilitou o conhecimento de diversos conceitos trazidos pela literatura. Através desses conceitos, foi possível sintetizar quais os requisitos que devem estar presentes para subsidiar a metodologia do trabalho, assim como as categorias de análise, na medida que estas últimas são baseadas em tópicos lançados por Klinger (2008, p.29), com destaque para a presença, cada vez mais intensa, da pesquisa/investigação nos processos de projeto computacionais. A distinção entre cooperação e colaboração, trazida por Kvan (2000, p.410) e Kleinsmann (2006, p.249), será aplicada na análise dos resultados para mapear como as duas aconteceram nos processos de projeto estudados, assim como os tipos de liderança presentes: a vertical e a horizontal (ou compartilhada).

Entender como os principais escritórios internacionais estabelecem a ponte entre o processo criativo e a fabricação de elementos arquitetônicos de forma complexa (CELANI;

LENZ, 2014, p.142) indica como essas modalidades podem interferir nos processos colaborativos da arquitetura contemporânea.

Além dos conceitos de cooperação/colaboração e liderança vertical/liderança horizontal, entender o potencial da comunicação entre os atores envolvidos nos projetos de equipe, quando estão nos momentos de negociação e avaliação, servirão de base para a troca de conhecimento entre diferentes graus de *expertises*, subsidiando o balanceamento da distribuição das equipes colaborativas dos experimentos de projeto desta tese.

2 REFERENCIAL EMPÍRICO

Considerando a importância da literatura vinculada à prática, na área do projeto paramétrico, este capítulo aborda a análise de processos e produtos de três projetos paramétricos notáveis, elaborados por equipes de profissionais experientes neste fazer. Os processos foram descritos e analisados a partir de dois tipos de fontes: 1) respostas dos responsáveis por cada projeto a um questionário aplicado eletronicamente; e 2) publicação dos projetistas descrevendo o processo de projeto. Só foi possível aplicar o questionário com dois dos três representantes dos projetos selecionados, uma vez que houve dificuldade de contactar projetistas do último para a aplicação do formulário eletrônico.

Hudson (2010, pp.76-219) indica diversos tipos de aplicação do projeto paramétrico. Ele classifica o estudo de processos de projeto de obras executadas no mercado da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) como literatura da prática. Nos estudos feitos pelo autor, o principal método de coleta de dados é o discurso dos autores dos projetos e, por isso, trata-se de um relato pós-processo de projeto. Por ser uma explanação subsequente, ele destaca que há um risco de não haver detalhes suficientes nas descrições, assim como um retrato fidedigno da realidade dos fatos. Porém, trata-se de uma estratégia de diversificação metodológica para conhecimento de casos concretos, dada a grande dificuldade de envolvimento do pesquisador em diferentes projetos.

Por ser um capítulo de referencial, não tem a pretensão de estabelecer relações comparativas diretas, uma vez que os projetos tiveram diferenças significativas de tempo para projetar, orçamento, local, pré-existências, número de pessoas da equipe, material, entre outros. A similaridade entre eles está no fato de terem aplicado a modelagem paramétrica para geração da forma ou para sua racionalização. O propósito foi utilizar as referências empíricas como casos a serem estudados em contextos específicos, buscando informações de natureza qualitativa, para que seja possível extrair possíveis rebatimentos à etapa de proposição de diretrizes metodológicas desta tese.

Os critérios utilizados para a seleção dos projetos foram:

- 1) Complexidade formal;
- 2) Utilização de modelação/modelagem paramétrica na geração da forma do edifício, ou de parte dele;
- 3) A obra já ter sido executada;
- 4) Disponibilidade de material publicado, e/ou haver a possibilidade de realização de entrevista.

As entrevistas (inquéritos) foram estruturadas considerando como parâmetros as categorias de análise criadas para a tese, que serão detalhadas mais adiante.

Cabe ressaltar que as análises estão centradas nos processos de projeto, e não nos projetos enquanto produtos. Apesar disso, referimo-nos aos nomes dos projetos (e não às equipes) por ser uma maneira mais fácil de identificá-los ao longo do texto.

Os três projetos selecionados tiveram materiais construtivos predominantemente distintos: concreto, madeira e aço. A escolha de projetos que utilizam esses materiais se deu, como já mencionado no capítulo da introdução, por serem os mais usuais na indústria da AEC. Beorkrem (2013, pp.8-13) apresenta, em sua obra, uma série de projetos baseados em restrições dos materiais, indicando como a seleção de materiais pelos projetistas podem variar de acordo com a vida útil, qualidades fenomenológicas, ou flexibilidade de seu detalhamento e conexões.

Cada referência empírica apresentada terá uma introdução, contendo uma breve apresentação do projeto e um resumo do processo, uma vez que essa abordagem metodológica não permite a realização de um mapeamento de ações projetuais por observação direta. Esse mapeamento só foi possível de realizar nos experimentos de projeto, devido à proximidade de observação do pesquisador com as equipes colaborativas.

Depois da introdução, os processos de projeto serão descritos a partir do enquadramento em quatro tópicos: problema de projeto; construtibilidade; projeto colaborativo; e meios de concepção. Estes são os quatro tópicos estruturantes das análises presentes no capítulo seguinte, onde se apresentam os experimentos de projeto.

As categorias de análise foram construídas a partir da concatenação entre o que diz a literatura e os dados obtidos com a realização do Experimento 01. As categorias definidas

antes da realização do Experimento 01, incluídas no questionário prévio à sua realização, foram: projeto geral; construtibilidade; projeto colaborativo; e modelagem paramétrica. Depois da sua realização, entendeu-se que a última categoria teria uma abrangência maior, devido à interferência que outros meios de concepção e representação tiveram ao longo dos processos de projeto.

Foi feita uma revisão na nomenclatura das categorias, tomando como base os tópicos de estratégias projetuais considerados críticos por Klinger (2008, p.29), no que diz respeito a equipes colaborativas que relacionam projeto e construção em arquitetura. A partir delas, que associam pesquisa, fabricação, consultoria, software e programação, foram derivadas as novas categorias para serem aplicadas na tese, nomeadas **problema de projeto**, **construtibilidade**, **projeto colaborativo** e **meios de concepção**. Esta nova terminologia inclui tanto a visão de outros autores notáveis da área, que já abordaram processos de projeto de modo mais amplo, como Lawson (2011) e Lebahar (1999), quanto a de outros que versam sobre projetos da arquitetura contemporânea e que utilizam programação computacional em seus processos, como Leach et al (2004), Kolarevic e Klinger (2008), Oxman e Oxman (2010) e Woodburry (2010).

Quadro 1 - Categorias de análise consideradas para a tese.

Categorias de Klinger (2008)	Pesquisa	Fabricação	Consultoria	Software e programação
Abrangência dos tópicos considerados essenciais pelo autor	• Pesquisa relacionada aos problemas de projeto • Relação entre academia e prática	• Conhecimento em fabricação digital aplicado a processos de projeto	• <i>Expertise</i> em diferentes áreas do conhecimento ligadas ao projeto	• Capacidade de criar soluções específicas com programação computacional
Categorias de análise sugeridas	Problema de projeto	Construtibilidade	Projeto colaborativo	Meios de concepção
Essência proposta para a análise dos processos de projeto da tese	• Pesquisa relacionada aos problemas de projeto e modelo tridimensional de restrições (LAWSON, 2011); • Relação entre conhecimento acadêmico e prático (KLINGER, 2008)	• Conhecimento em processos construtivos, sejam convencionais ou por fabricação digital (KLINGER, 2008); (OXMAN e OXMAN, 2010); (LEACH et al, 2004)	• <i>Expertise</i> em diferentes áreas do conhecimento ligadas ao projeto de arquitetura (KLINGER, 2008); (BERNSTEIN, 2008); (KOLAREVIC e KLINGER, 2008)	• Capacidade de criar soluções com meios de concepção e representação analógicos ou digitais (KLINGER, 2008) (LEBAHAR, 1999). • Jovens com habilidades em matemática, computação e projeto (WOODBURRY, 2010)

A primeira categoria, **problema de projeto**, inclui a busca por informações para uma melhor compreensão do problema de projeto que está posto. Destacamos aqui a mudança

de paradigma dos projetos computacionais, que incluem, cada vez mais, a pesquisa relacionada ao problema de projeto, de acordo com Hensel e Nilsson (2019, pp.1-12). Os elementos analisados nesta categoria abarcam a identificação das restrições projetuais encontradas nos processos de projeto, como modo de apontar quais os critérios que estão sendo priorizados durante a concepção. A segunda categoria, nomeada **construtibilidade**, representa conhecimentos em processos construtivos diversos, sejam eles utilizando meios tradicionais ou computacionais, complementarmente ao que prevê Klinger (2008, p.29), que limita esse conhecimento unicamente à fabricação digital. Do ponto de vista do **projeto colaborativo**, a categoria não muda basicamente o conceito do autor que serviu de fundamento para a criação das categorias da tese, mas acrescenta o que outros autores notáveis já trouxeram cientificamente para a área de conhecimento. A última categoria, de **meios de concepção**, está relacionada à competência na utilização de multimeios e multidomínios, que vão desde o croqui até à programação computacional, como competências importantes que podem fazer a diferença durante o processo de projeto e a obtenção do resultado projetual.

2.1 Toledo Gridshell, Nápoles (Itália)

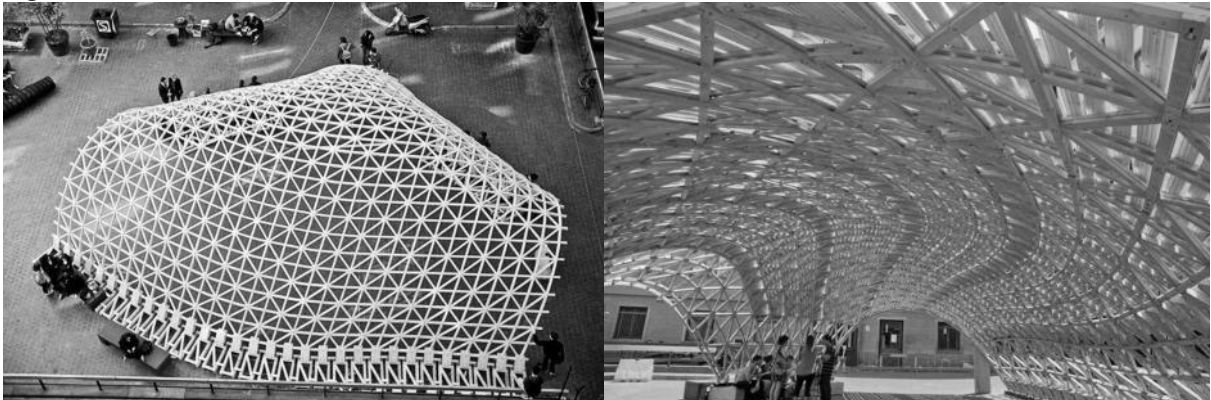
Introdução

O projeto e a construção do “Toledo Gridshell” foi uma dentre inúmeras experiências realizadas pelo grupo de pesquisa *Gridshell.it*, formado por uma equipe multidisciplinar da Faculdade de Arquitetura de Nápoles, Itália. As informações aqui relatadas foram obtidas a partir de publicações dos projetistas/pesquisadores (COLABELLA *et al.*, 2015; D’AMICO *et al.*, 2015; PONE *et al.*, 2013) e de entrevista aplicada com um dos membros da equipe, o arquiteto italiano Daniele Lancia.

Trata-se de uma superfície executada com peças de madeira leves que, quando cruzadas, formam uma grelha flexível. Foi construída para o pátio da escola de arquitetura da Universidade de Nápoles Frederico II (Figura 24).

Beorkrem (2013, p. 14) refere-se ao uso da madeira como material de processamento fácil e econômico, que possibilita uma gama de tipos de conexão, fazendo dela um dos materiais mais variados, apesar de visivelmente restritos, que os arquitetos podem usar.

Figura 24 – Modelo construído da Toledo Gridshell, em vista superior (esq.) e interna (dir.).



Fonte: ToledoGridshell (2013, pp.1-3).

O projeto foi concebido em um curto prazo, de apenas 20 dias, e a obra, executada em um período ainda menor, de 15 dias. A velocidade de projeto e execução pode ser atribuída: à grande experiência da equipe neste tipo de projeto e execução, que não exige materiais pesados ou que precisem de cura, como o concreto; ou a equipes muito especializadas, por usar apenas dois materiais – madeira leve e conectores metálicos pré-fabricados.

Problema de projeto

O grupo de profissionais envolvidos na obra dedica-se há alguns anos à pesquisa em projeto e execução de superfícies estruturais em malha de madeira com pequenas áreas de seção, do tipo pós-formadas, conhecidas na literatura como *post-formed gridshells*. A pesquisa em projeto, definida por Hensel e Nilsson (2019, p.2) e Klinger (2008, p.29) como uma das bases do pensar o projeto pela execução. Foi uma condição de saída para esse projeto, uma vez que foi conduzida por diversos pesquisadores experientes nessa tipologia arquitetônica.

Segundo os autores (PONE *et al.*, 2013a), a pesquisa feita para os seus projetos envolve três estágios: o primeiro, com a “análise e imersão na tipologia *Gridshell*, cuja resistência da forma pode ser combinada com o uso de peças de madeira de pequenas dimensões”. O segundo estágio envolve o “projeto guiado pela construção e estrutura, e vice-versa”. Neste momento, a forma do projeto aparece a partir das deformações geradas por um modelo físico de escala reduzida, que alimenta modelos em escala 1:1. Foi dada significativa relevância aos ensinamentos de grandes arquitetos e engenheiros do século XX, através da análise dos processos de simulação de formas derivadas de estruturas encontradas na natureza (PONE *et al.*, 2013a, p.2). No último estágio, foi feito o reconhecimento acerca do material aplicado na construção e quais as novas ferramentas digitais de projeto a ser incorporadas, quando se substituíssem os modelos físicos pelos modelos computacionais (PONE *et al.*, 2013a, p.1).

Para lidar com os problemas do projeto, a equipe desenvolveu uma grande integração entre a pesquisa acadêmica e as experimentações. Isso envolveu o estudo de precedentes históricos, imersão em novas ferramentas de projeto e ensaios de propriedades físicas dos materiais.

O projetista entrevistado declarou que as principais restrições que usualmente são consideradas nos projetos da equipe são, respectivamente, de ordem funcional, formal e construtiva. Contudo, as restrições de projeto relativas às pré-existências e aos requisitos funcionais e legais não foram mencionadas nas publicações nem nas respostas ao questionário eletrônico, ainda salientando que tais limitações possivelmente não interferiram significativamente no processo de projeto, desalinhando o discurso da prática.

O diálogo entre forma e a sua construtibilidade parece ser o principal foco de atenção dos projetistas, durante o processo do projeto descrito nas publicações (COLABELLA *et al.*, 2015; D'AMICO *et al.*, 2015; PONE *et al.*, 2013), mas as análises de viabilidade construtiva parecem ter consumido mais tempo dos projetistas, por terem tido maior peso em seus discursos, se comparadas com a restrição formal.

O Toledo Gridshell, por ter como natureza tipológica do projeto um pavilhão, não gera potenciais problemas funcionais a serem resolvidos, pois não há divisões de ambientes internos. O que dispensa pensar detalhadamente em fluxos, relação entre ambientes, distribuição de mobiliário e equipamentos, entre outros. Isso levou a uma condição na qual as restrições formal e construtiva tivessem mais liberdade para dialogar.

Construtibilidade

As técnicas *form-finding* são aquelas em que se busca por um resultado formal a partir do resultado da aplicação de forças da física em objetos ou a partir de processos de formação da forma encontradas na natureza.

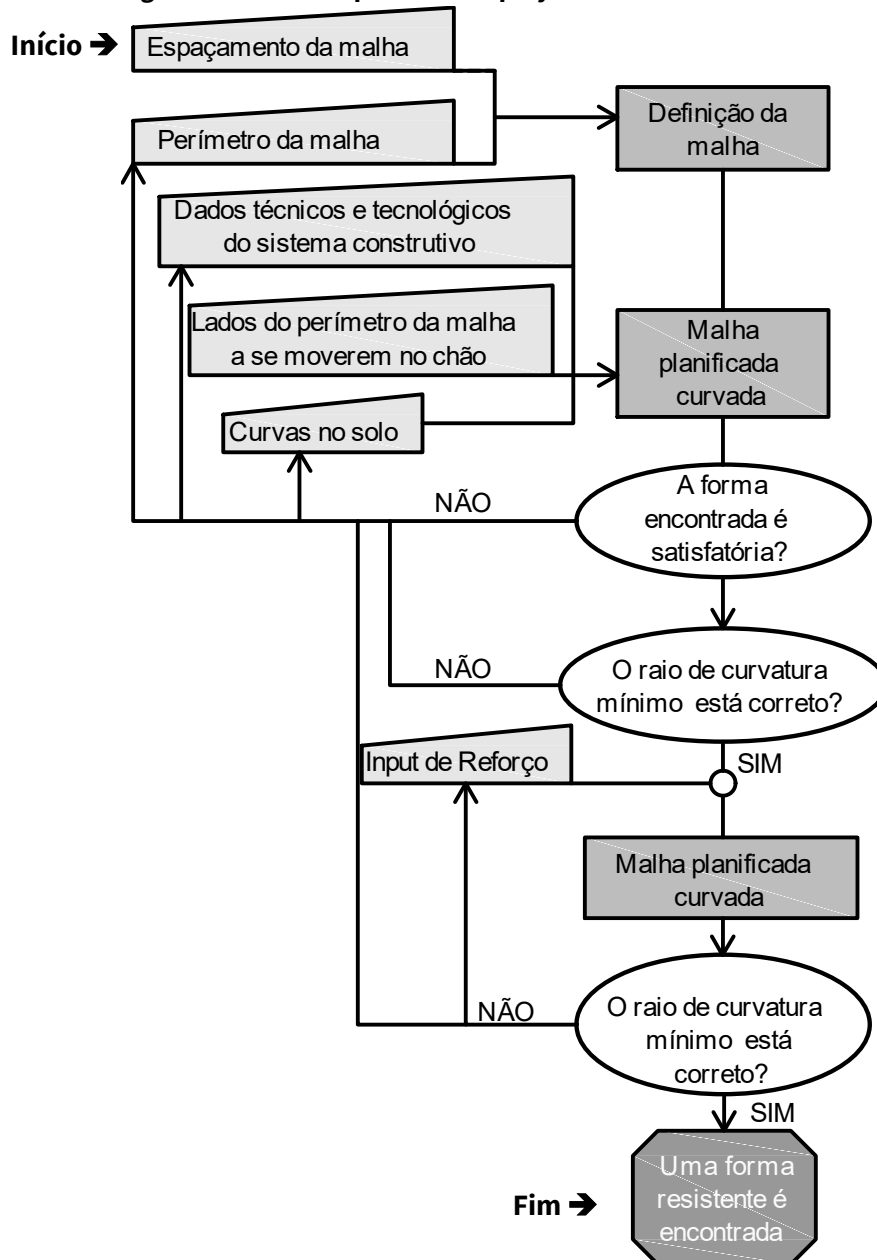
O estudo da tipologia Gridshell pós-formada traz dificuldades construtivas inerentes ao *form-finding*, por se tratar de um processo em que uma malha planificada de elementos leves, como a madeira, depende da aplicação de forças em suas extremidades para gerar uma superfície. Desse modo, a predição do comportamento dessa forma resultante depende muito do conhecimento, do desempenho do material, e de regras construtivas. Pois são elas que contribuem para determinar a forma final do objeto.

No caso concreto do Toledo Gridshell e das demais estruturas projetadas pela equipe, o material, as suas dimensões e o método construtivo são o ponto de partida. Eles são definidos mesmo antes do início da geração da forma. Assim, observa-se que **geometria** e **construção** estão extremamente interligados, confirmando que o uso de parâmetros computacionais para definir a geometria de elementos construtivos tem eficácia crescente, quando incorporado no processo de projeto (FLORIO, 2012, p.44).

O grupo de projetistas desenvolveu um fluxo de trabalho a ser aplicado em todos os seus projetos de Gridshell, centrados basicamente na obtenção da forma e em características construtivas (Figura 25).

Considerando as dimensões internas do pátio da escola de arquitetura de Nápoles e do espaço disponível para o projeto, foi definida uma malha de madeira planificada, no formato de um retângulo, com dois de seus vértices chanfrados. Além do perímetro, foi definido também o espaçamento da malha, em função do tamanho total da superfície. A observância desses quesitos foi talvez o único momento em que restrições funcionais foram observadas, como por exemplo a circulação livre do pátio e o acesso das pessoas à cobertura.

Figura 25 - Fluxo do processo de projeto.

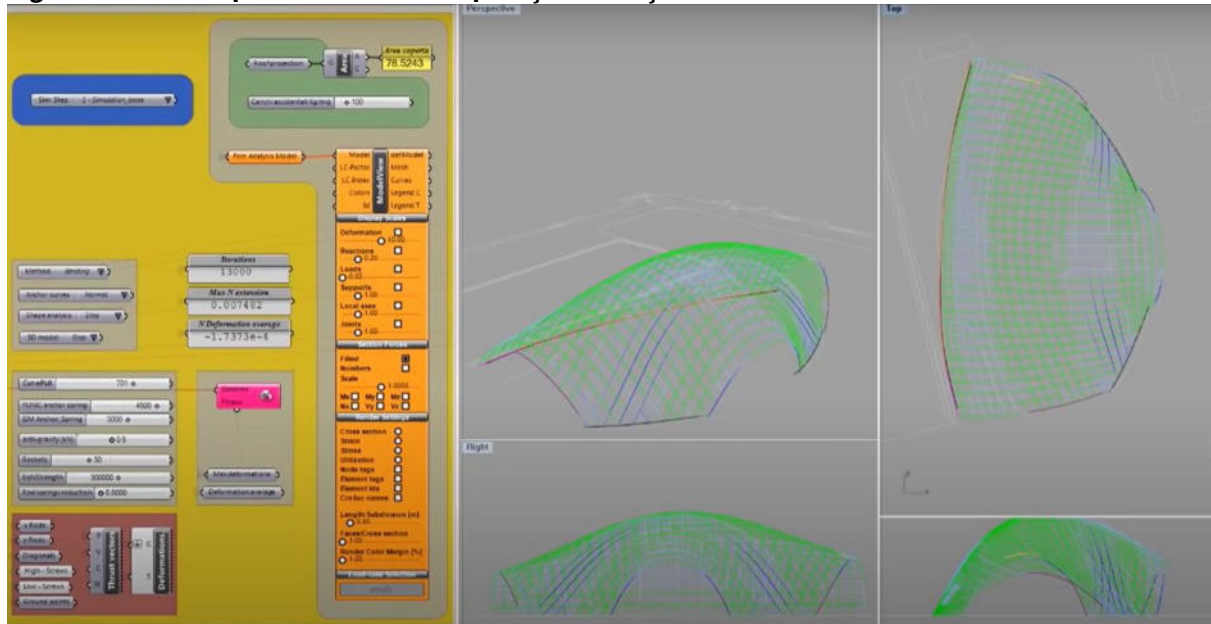


Fonte: Adaptado de Pone *et al.* (2013a).

Uma vez conhecidos os dados técnicos e tecnológicos do sistema construtivo e da tipologia, os passos seguintes foram determinar em quais dos lados do perímetro seriam aplicadas as forças, para que pudessem deslizar no chão do pátio. Os lados escolhidos, antes de receberem as forças de compressão, foram submetidos a uma curvatura, que seria marcada apenas na vista superior, não representando curvatura da superfície.

Aplicadas as forças no modelo computacional, a forma passou a ganhar altura, e consequentemente, tornou-se uma superfície de dupla curvatura. O processo de geração da forma foi, portanto, resultado das forças aplicadas no lado maior do retângulo e nos trechos chanfrados, de maneira que a estrutura começou a ganhar a aparência resultante das restrições construtivas impostas (Figura 26).

Figura 26 – Modelo paramétrico com a aplicação de forças em três lados da Gridshell.



Fonte: Pone *et al.* (2013).

Na obra, esse processo de aplicação de forças foi feito por meio de conexões do tipo bota de jangada, tornando possível a aplicação das forças de modo gradativo, e fazendo com que a curvatura dos lados pretendidos fosse alcançada.

O modelo paramétrico elaborado pelos projetistas condensa anos de experiência na construção de estruturas Gridshell em escala reduzida e em escala natural. O arquiteto declarou que “o modelo paramétrico conseguiu simular o processo construtivo, e nos deu a resposta de comportamento da Gridshell, que nos possibilitou modificar a forma para buscar melhores resultados”.

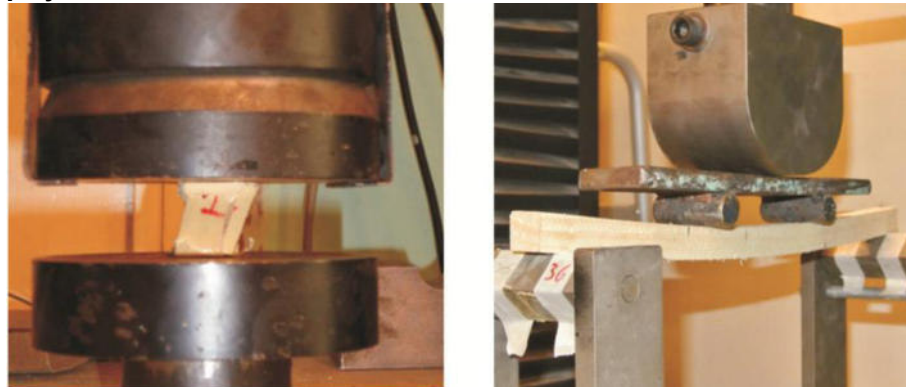
O passo seguinte do processo foi verificar, no modelo computacional paramétrico estrutural (utilizando a combinação do *software Rhinoceros*, *plug-in Grasshopper* e *add-on Karamba3D*), se as curvaturas mínimas encontradas nos testes de momento fletor (Figura 28) estavam sendo atendidas. Caso contrário, teriam que retornar para a manipulação dos parâmetros que controlavam as forças e as dimensões dos lados, para que as curvaturas mínimas fossem atendidas. Esse processo final de manipulação computacional mostrou o quanto as **restrições construtivas** condicionaram a geração da forma, figurando como base fundamental ao processo de projeto e construção do Toledo Gridshell.

Figura 27 – Esquema da diagonal (esq.), conexão do tipo bota de jangada (centro) e torção da malha por suportes (dir.).



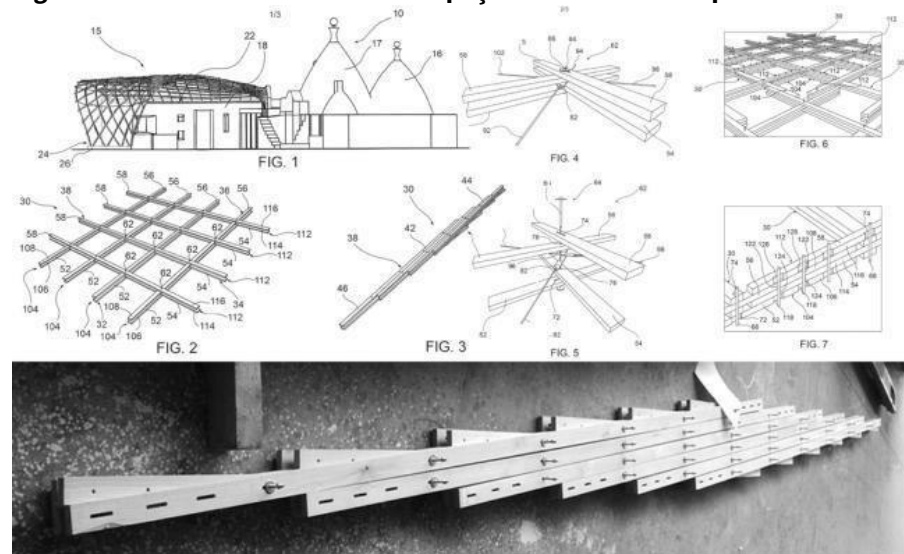
Fonte: Pone *et al.* (2013).

Figura 28 – Testes de momento fletor em amostra da madeira utilizada no projeto.



Fonte: Pone *et al.* (2013).

Para os elementos de conexão entre as duas camadas de peças de madeira, foram usados parafusos, que permitiram apenas a rotação ao longo do seu eixo longitudinal. Eles fizeram com que um conjunto de peças de madeira se juntasse para ser transportado como leque (Figura 29). Consequentemente, foi possível realizar a montagem de macro módulos de grelhas, agilizando o processo de montagem, e facilitando a pré-fabricação e a logística de transporte.

Figura 29 – Conexões estruturais das peças de madeira com parafuso.

Fonte: Pone et al. (2013).

A madeira parece ser o único material utilizado nos projetos da equipe, assim como a tipologia *Gridshell* parece ser a predominante em sua produção técnica. Por essa razão, o conhecimento de soluções construtivas nesse material e tipologia é alto, indicando grande *expertise* da equipe para encontrar soluções construtivas de modo rápido e eficiente. Isso também pode ser considerado como um fator determinante para a grande velocidade com a qual a equipe projeta e constrói/construi o objeto arquitetônico.

Projeto colaborativo

Os projetistas do Toledo Gridshell foram também os construtores. A equipe contou com pesquisadores e projetistas: cinco arquitetos (entre professores e estudantes de pós-graduação) vinculados à Escola de Arquitetura e Design da Universidade Federico II, de Nápoles; um estudante de doutorado, de formação não identificada, e vinculado ao Centro de Engenharia da Madeira, da Universidade Edinburgh Napier, de Edimburgo, Reino Unido; além do professor Sérgio Pone, enquanto coordenador do grupo de pesquisa *Gridshell.it* e principal autor das publicações que envolvem estudos em *Gridshell*. A composição da equipe deu a entender a existência de uma estrutura hierárquica tipicamente presente em projetos de pesquisa da universidade.

Figura 30 – Montagem da Toledo Gridshell pela equipe (esq.), e equipe no topo da estrutura (dir.).



Fonte: ToledoGridshell (2013, pp. 1–3)

O professor foi, segundo o arquiteto entrevistado, o membro que mais contribuiu durante o processo, em razão de sua vasta experiência em projeto e construção desse tipo de estruturas. Sob esse ponto de vista, há indícios de que ele figurou como líder vertical da equipe, em um processo típico onde um líder vertical distribui tarefas aos demais membros. Contudo, a intensa participação dos demais projetistas em momentos de liderança horizontal (MÜLLER *et al.*, 2018) e o seu poder de decisão fazem transparecer que o projeto e a construção foram concebidos em um ambiente típico de projeto colaborativo, com tarefas comuns desenvolvidas por toda a equipe; e com momentos de alternância de lideranças horizontais.

Meios de concepção

Os meios de concepção, neste projeto, foram determinantes na maneira de conceber o objeto arquitetônico. Os projetistas escolheram as ferramentas cuidadosamente, uma vez que a forma arquitetônica só poderia ser revelada com o uso de recursos que permitissem a predição do comportamento dos materiais. Isto porque, em determinadas técnicas de *form-finding*, a geometria final só é conhecida depois da aplicação das forças na direção e intensidade escolhidas.

Neste caso, o uso da modelagem paramétrica e da análise estrutural paramétrica foi peça-chave para a predição do resultado da construção. Apesar da grande importância dos dois meios de projeto citados, a integração com croquis, desenhos técnicos e *mock-up* (este último, realizado em projetos anteriores) foi fundamental para aliviar os impasses encontrados em determinados momentos do processo de projeto.

Quadro 2– Meios de concepção utilizados pela equipe de projeto do Toledo Gridshell.

FASES DO PROJETO →	Estudo preliminar	Anteprojeto	Projeto executivo
MEIOS DE CONCEPÇÃO ↓			
Desenho à mão	●	O	O
Modelo físico	O	O	O
Desenhos técnicos	●	●	O
Modelagem geométrica	O	O	O
Prototipagem digital	●	●	O
Modelagem paramétrica	O	O	O
Análise estrutural paramétrica	O	●	O
Modelo BIM	O	O	O
Mock-up	O	●	O

Legendas

Fases de projeto: EP (Estudo Preliminar); AP (Anteprojeto); PE (Projeto Executivo).

Meios de concepção: ● - utilizado; O - não utilizado; ∇- Não identificado

As principais ferramentas digitais aplicadas foram o *software Rhinoceros*, o *plug-in Grasshopper* e o *add-on Karamba3D*. Apesar da pouca variedade de meios usados na concepção do objeto arquitetônico, eles foram minuciosamente escolhidos para serem aplicados em situações-chave do projeto. Não significa, porém, que outros meios não poderiam ter sido úteis. Devido à experiência da equipe com outros projetos de mesma natureza, onde foram aplicados com muita intensidade modelos físicos manuais, de escala reduzida, foi gerado um acervo de soluções aplicadas a este projeto. A exploração anterior de multimeios e multidomínios (LEBAHAR, 1999, p.45) foi, neste caso, especificamente direcionada para os problemas já conhecidos do repertório de soluções dos projetistas.

2.2 Arena do Morro, Natal (Brasil)

Introdução

A Arena do Morro é um ginásio poliesportivo e multiuso (Figura 31), integrado à Escola Estadual Dinarte Mariz, no bairro de Mãe Luíza, em Natal/RN, Brasil, financiado pela Fundação Ameropa e cujo projeto tem autoria do escritório suíço Herzog e DeMeuron (HdM), em parceria com uma empresa de projetos que reuniu uma equipe local brasileira (Plantae). O ginásio está construído em um bairro frágil econômica e socialmente e o edifício é um grande marco para os moradores da área e para a cidade, sendo o único projeto elaborado pelo escritório HdM com obra concluída no Brasil até o momento.

O ginásio foi projetado usando materiais como o concreto (presente nos cobogós e estrutura de concreto das paredes) e o aço (aplicado no sistema de cobertura e nas telhas). Sistemas construtivos em tijolos e concreto são comumente escolhidos, segundo Beorkrem (2013, p. 114), pela sua durabilidade.

Seu programa é dividido em dois níveis. No primeiro, estão distribuídas uma quadra poliesportiva, arquibancadas, salas de aula, vestiários, banheiros, salas multiuso e depósitos. O segundo nível contém um terraço aberto de contemplação.

Figura 31 – Arena do Morro.



Fonte: acervo do autor.

Os dados do processo de projeto foram coletados predominantemente por meio resposta a um questionário eletrônico (Apêndice A), respondido pelo arquiteto associado do escritório HdM, o búlgaro Tomislav Dushanov, gerente de projeto da Arena do Morro. As respostas do arquiteto foram complementadas com dados encontrados na publicação do processo de projeto e construção do edifício Herzog&DeMeuron (2014). Adicionalmente, a terceira fonte de informações foi a experiência pessoal do próprio autor desta tese, que trabalhou como arquiteto da equipe local do projeto.

O projeto foi desenvolvido entre os anos de 2011 e 2013, e a obra, por sua vez, teve um ano de duração (entre 2013 e 2014). A inauguração do edifício foi feita dois meses antes da Copa do Mundo de Futebol de 2014, o que ocorreu no Brasil, tendo Natal como uma das cidades-sede para os jogos do torneio. Por essa razão, o ginásio foi inaugurado no mesmo ano do estádio que sediou os jogos, a Arena das Dunas.

Problema de projeto

O projeto originou-se a partir de uma vasta análise de diretrizes contidas em um diagnóstico urbano realizado no bairro de Mãe Luíza, descrita no livro “Uma Visão de Mãe Luíza”, publicado em 2009. O livro é de autoria do escritório HdM e teve também a participação intensa da comunidade local, que disponibilizou informações de ordem histórica, social e econômica da cidade. A partir dos principais problemas detectados no bairro, o livro finaliza com um capítulo em que é proposta a implantação de equipamentos de uso público (Figura 32). De entre as possibilidades existentes, a escolhida pelo cliente, usuários e projetistas foi a de construir um Ginásio Poliesportivo.

Para o desenvolvimento dos primeiros estudos de viabilidade do projeto, a primeira informação solicitada pela equipe suíça à equipe local foi um levantamento de possibilidades de ocupação do edifício no terreno. Isso fez com que a primeira restrição projetual tenha sido de ocupação e a altura do futuro edifício, caracterizada como restrição prática, imposta por legisladores, segundo o modelo tridimensional de problema de projeto de Lawson (2011, p.106).

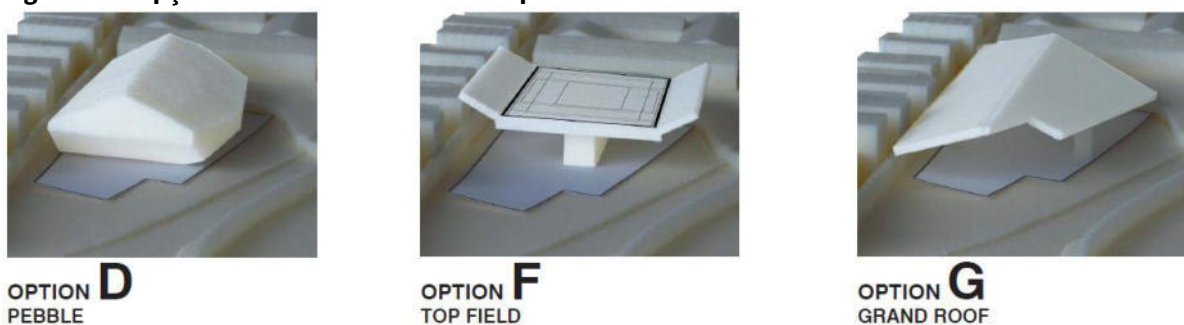
Figura 32 – Volumetria com proposta de equipamentos públicos para Mãe Luíza, com destaque para a Arena do Morro.



Fonte: Herzog&DeMeuron (2014, p.5).

Foram apresentados estudos volumétricos de A a G, que combinaram as restrições de ocupação e altura impostas pela legislação e requisitos funcionais de um programa pré-definido pelo escritório HdM e equipe local de projeto (projetistas), Centro Sócio Pastoral (cliente) e representantes da comunidade (usuários). Os estudos D, F e G foram os escolhidos como potencialmente viáveis (Figura 33), por melhor combinarem as duas restrições anteriormente mencionadas. Os estudos A a C não foram apresentados por não constarem nos arquivos do processo de projeto.

Figura 33 – Opções de estudos volumétricos potencialmente viáveis.

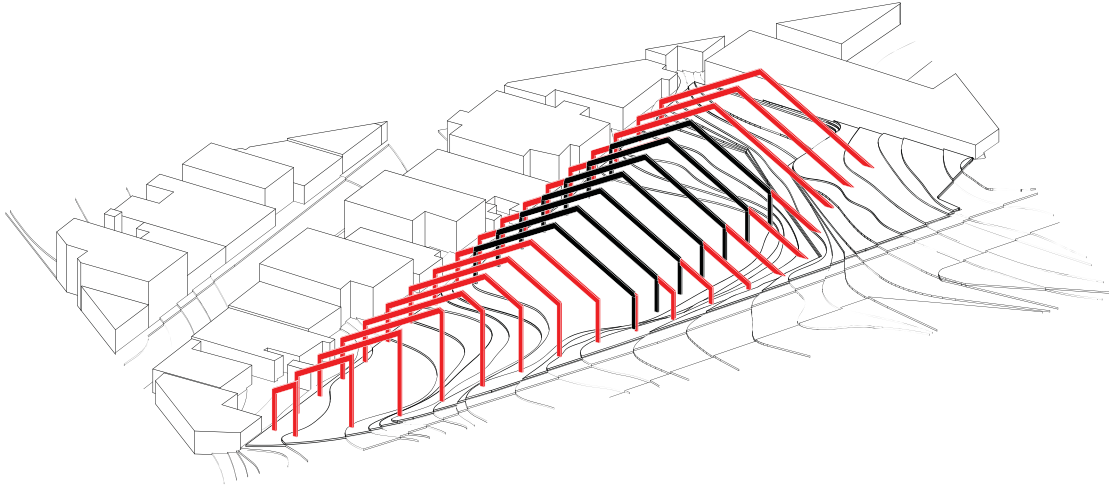


Fonte: Herzog&DeMeuron (2014, s.n).

Ficou resolvido que a proposta da grande cobertura seria a que atenderia melhor às restrições inicialmente impostas, sendo a legislação a principal definidora do partido arquitetônico. O Plano Diretor da cidade estabelece que o bairro possui limitação de gabarito de 7,50 metros, mas o equipamento esportivo precisava ter 11,50 metros para acomodar a quadra e suas funções. Como os pórticos ainda existentes do antigo ginásio da escola já estavam com a altura pouco abaixo da requerida, ficou decidido que a área da

quadra seria ligeiramente rebaixada, e a estrutura existente seria prolongada até os limites dos recuos permitidos pela legislação (Figura 34).

Figura 34 – Proposta de prolongamento da estrutura do ginásio existente.



Fonte: Herzog&DeMeuron (2014, p.12).

Depois de definida a geometria geral do edifício, foram desenvolvidas propostas de subdivisão dos ambientes internos e, concomitantemente, foram escolhidos materiais e métodos construtivos a serem aplicados. Neste momento apareceram as primeiras restrições construtivas do projeto.

Os projetistas declararam que as três restrições de projeto que costumam aparecer com maior peso em sua prática são: funcional, legal e construtiva. Todas enquadram-se como restrições práticas, pelo modelo de problema de projeto de Lawson (2011, p.106). Contudo, para o projeto aqui descrito e analisado, diversas restrições se alternaram, estando as mais determinantes listadas a seguir, por ordem de surgimento:

1ª restrição: prática (legislação)

2ª restrição: formal

3ª restrição: prática (funcional)

4ª restrição: construtiva

Apesar de figurar em último lugar, a restrição construtiva foi a que mais exigiu tempo e esforços dos projetistas, pois demandou testes de diversas alternativas sempre que houve a possibilidade de abandono de algum material ou técnica construtiva.

A pesquisa em projeto, como destaca Klinger (2008, p.29), relacionou parcerias entre a prática e a academia. De entre os vários estudos feitos, destacam-se os ensaios de desempenho de materiais, o teste de efeito geométrico de subelementos estruturais, o teste de resistência à ruptura de corpos de prova e as simulações de pigmentação de concreto. Foi investido, também, muito tempo de pesquisa nos quesitos a seguir:

- Estudo de precedentes de edifícios esportivos na cidade;
- Estudo de materiais disponíveis no mercado local;
- Estudo de possíveis novas técnicas construtivas aplicadas a materiais locais;
- Desenvolvimento de *script* para modelar parametricamente as paredes do edifício, promovendo a racionalização geométrica da fachada;
- Simulações de desempenho térmico;
- Simulações de desempenho acústico.

Construtibilidade

Quando a proposta de estudo volumétrico da grande cobertura foi aprovada, foram feitas predefinições de materiais: cobertura em estrutura e telhas metálicas, fechamentos verticais em toras de madeira, do tipo eucalipto de reflorestamento, e piso em superfície contínua, em material a definir. A partir dessas predefinições, o processo de projeto seguiu com a integração das três partes principais do edifício: cobertura, paredes e piso.

Para o projeto final, no entanto, ficou definida uma alteração nas paredes do edifício. Desse modo, a aparência do edifício contou com uma cobertura de formas retilíneas irregulares feitas em metal, o piso em superfície contínua em granilite, e as paredes compostas por pilaretes e vigas de concreto e graute, vedados por blocos de concreto (cobogós) conectados entre si por encaixes metálicos. Devido à modelagem paramétrica ter sido aplicada apenas às paredes, estas receberão maior atenção na descrição e análise feitas neste capítulo. Contudo, será necessária a descrição das demais partes do edifício, para o entendimento global do projeto, uma vez que a parede se relaciona construtivamente com todas as outras partes.

Para a cobertura, os autores do projeto pretendiam aplicar telhas comerciais, mas organizá-las em orientação diferente da sugerida pelos manuais de instalação. Enquanto o

sentido de instalação das telhas, recomendado pelos fabricantes, deveria seguir no sentido da inclinação da cobertura, o projeto inicial do edifício considerou-o ligeiramente inclinado em relação à direção transversal da queda d'água. Essa mudança de orientação criou uma barreira na lógica construtiva tradicional, pois a sua construtibilidade não era viável, em um primeiro momento, devido a dois motivos: as águas pluviais não poderiam ser coletadas e seriam criados, na cumeeira do edifício, diversos cortes nas telhas difíceis de serem feitos, especialmente pela falta de maquinário local para esse tipo de operação.

Os projetistas concluíram que o problema de projeto relativo à coleta de águas só poderia ser resolvido quando houvesse a colaboração do engenheiro de instalações prediais. Para solucionar essa questão, as telhas foram projetadas em sentido transversal à queda d'água, sem qualquer declinação, ficando marcadas no sentido longitudinal do edifício. Foram idealizadas, para tanto, pequenas calhas (Figura 35) que cruzam a cobertura do edifício transversalmente, a cada cinco metros.

Por recomendação do engenheiro calculista, a estrutura metálica das vigas e terças só deveriam possuir solda em ambiente fabril. Isso minimizaria futuras corrosões à estrutura. Essa premissa do projeto estrutural, integrado ao arquitetônico, desencadeou um planejamento logístico em que as peças estruturais a serem aparafusadas na obra deveriam ter dimensões e peso compatíveis com os caminhões disponíveis.

As paredes da Arena do Morro foram a parte do edifício que mais desencadeou alterações no projeto, pois exigiram reavaliações de constantes mudanças ocorridas ao longo do processo. A escolha da madeira enquanto material sofreu resistência da população, que não aceitava o insumo devido à sua associação cultural às casas de taipa. Outros fatores que fizeram com que o seu uso fosse dispensado foram a falta de resistência a incêndio e o custo. Surgiu, então, como alternativa, o concreto, por ser de grande aceitação popular e possibilitar a equalização dos outros dois problemas que acompanhavam a escolha da madeira.

Figura 35 – Cobertura da Arena do Morro com definição da pequena calha.



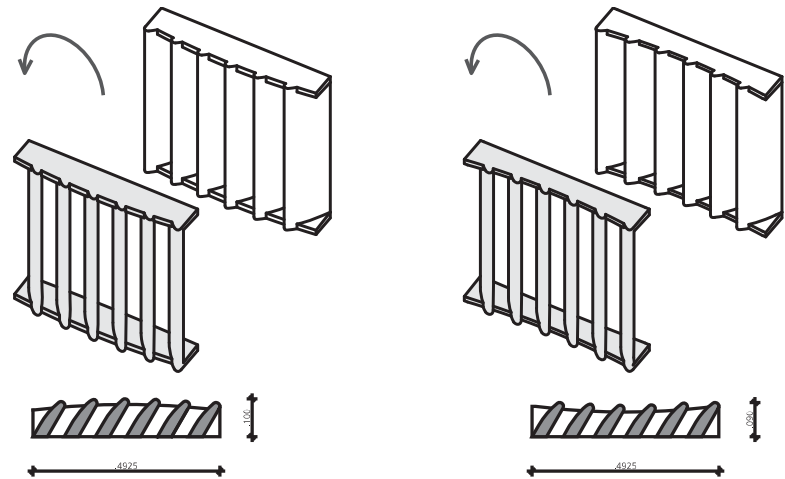
Fonte: Herzog&DeMeuron (2014, p.18).

Ficou definido que as paredes seriam de blocos vazados de concreto (cobogós), elemento de uso recorrente na cultura construtiva brasileira, que permite tanto a permeabilidade aos ventos como a flexibilidade formal. Dois tipos de cobogó foram projetados (um côncavo e outro convexo), para se adaptarem a todas as curvaturas do projeto (Figura 36). Como essa nova escolha trouxe consigo encaixes mais complexos, a equipe de projetistas local, que utilizava os *softwares Rhinoceros* e *AutoCAD* para modelar e desenhar o projeto, teve uma grande dificuldade de representar os blocos ao longo de caminhos curvos com os comandos pré-definidos dos programas. Essa situação fez com que a divisão de programação computacional do escritório HdM criasse um *script* específico para acomodar os cobogós de modo ágil nos dois programas, otimizando a visualização de alternativas de projeto.

A incorporação do **aspecto construtivo** a essa definição paramétrica de acomodação dos elementos aconteceu, portanto, depois de conhecidas as dimensões de cada cobogó e sua **geometria**, assim como do caminho percorrido pelas paredes. Logo, a variação das alternativas daria possibilidades diferentes de escolha de posicionamento dos pilaretes (pilares de pequena área de seção) e das vigas de amarração, facilitando a integração com o projeto estrutural (Figura 37). Desse modo, os cobogós e o sistema estrutural convergiram para uma fusão entre as restrições de geometria e de construção, indicando que “o rigor geométrico e a capacidade de simulação da modelagem

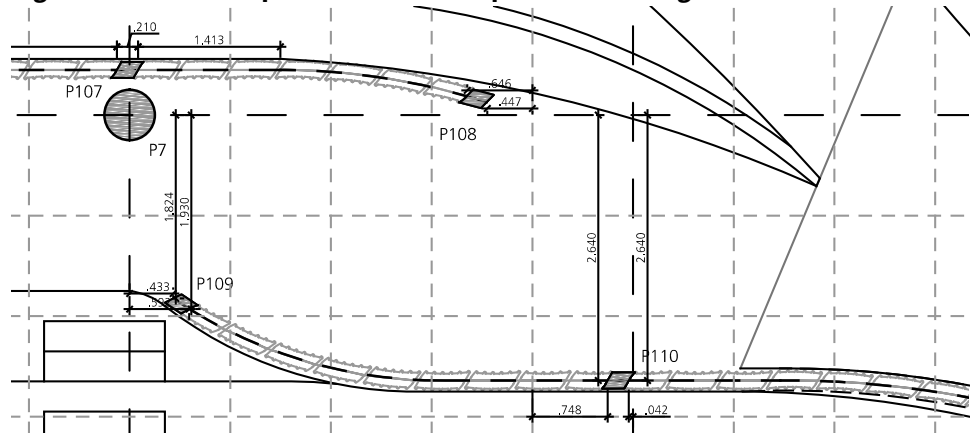
computacional podem ser implantados para integrar restrições de manufatura, logística de montagem e característica dos materiais na definição de sistemas materiais e construtivos” (MENGES, 2011, p.199).

Figura 36 – Tipos de cobogós distribuídos parametricamente.



Fonte: Herzog&DeMeuron (2014, p.22, fig. A e B).

Figura 37 – Planta de posicionamento de pilaretes e cobogós.



Fonte: Herzog&DeMeuron (2014, s.n).

Depois de decidido computacionalmente como seria a forma das paredes, iniciou-se o processo de análise de viabilidade construtiva do que havia sido idealizado computacionalmente. Inicialmente, foram utilizados modelos físicos de escala reduzida, seguidos por modelos prototipados em máquinas roteadoras, utilizando a espuma de alta densidade como material resultante (Figura 38).

Figura 38 – Protótipo do bloco de concreto fabricado digitalmente com espuma de alta densidade.



Fonte: Acervo do autor.

Verificou-se que a proposta de assentamento dos blocos empilhados, e sem transpasse, geraria problemas de estabilidade em paredes altas. Isso fez com que fosse idealizado um conector metálico, em aço inoxidável, para dar estabilidade vertical contra tombamentos. Esta solução foi testada em diversas alternativas de material, em momento posterior, quando da construção do *mock-up* da parede. Para a estabilização horizontal e vertical, foram idealizados pilaretes e vigas, que ficaram disfarçados para o interior do edifício. Também em fase de *mock-up*, foram necessárias alterações nessas estruturas, especialmente por causa da baixa resistência do concreto. Foi preciso utilizar o concreto com adição de graute, devido à sua capacidade de elevar a resistência estrutural de peças esguias. Todas essas peculiaridades exigiram um alto investimento de tempo, não fosse a aplicação de recursos computacionais ao projeto, em especial, neste caso, o uso de *scripts*.

Outro processo construtivo que sofreu alteração quando construído o *mock-up* da parede foi a fôrma do cobogó. Inicialmente, esta havia sido produzida manualmente por um ferreiro. Porém, não alcançava níveis de precisão geométrica na sua superfície, a ponto de manter o molde preciso o suficiente, o que gerava problemas na desmoldagem do cobogó. Muitos testes foram feitos e, mais tarde, com a descoberta de empresa local que fazia a usinagem de blocos maciços de aço (Figura 39), foram confeccionadas as fôrmas dos dois tipos de blocos existentes na obra a partir da sua fabricação digital.

O piso da Arena do Morro pouco mudou ao longo do processo de projeto. Em princípio, idealizou-se o piso em blocos cerâmicos lixados, para obtenção de textura mais dinâmica. Devido à dificuldade de execução e resistência do material, optou-se pela adoção de piso contínuo de granilite de alta resistência. O piso foi aplicado em todos os ambientes do edifício, e testes de arremates, coloração e espaçamento de juntas de dilatação foram feitos na fase do *mock-up* do piso. As dificuldades encontradas no tocante aos aspectos de construtibilidade relacionados ao piso, entretanto, foram mínimas, se comparadas com a cobertura e as paredes.

Figura 39 – Processo de desmoldagem do cobogó a partir de fôrma usinada.



Fonte: Herzog&DeMeuron (2014, p.23, fig. Segundo Protótipo do Bloco).

Apesar da completude de informações do projeto executivo, a etapa de obra ainda exigiu a tomada de decisões. Dois aspectos de construtibilidade apareceram durante essa fase. O primeiro foi o encaixe de blocos de concreto apenas em faces de vigas, ou seja, aqueles cobogós que ficavam em cima de portas (Figura 40). A resolução foi testada e implementada na obra, quando do uso de conectores metálicos que atravessaram as vigas e os cobogós, fixados com graute (concreto de alta resistência).

Outro impasse que surgiu na fase de obra foi relativo à cobertura. Ocorreu a flexão de terças em balanços maiores que três metros. Isso poderia fazer com que a cobertura entrasse em ressonância, trazendo alto risco de colapso estrutural. A partir de um novo *mock-up*, foram feitos em que a terça foi duplicada e reforçada, sem quaisquer prejuízos à concepção estrutural e à arquitetura do edifício (Figura 41).

Figura 40 – Estrutura de concreto das paredes, durante o recebimento dos blocos de concreto.



Fonte: Herzog&DeMeuron (2014, p.21, fig. Construção 04.13).

Figura 41 – Reforço estrutural das terças metálicas em balanço.



Fonte: Herzog&DeMeuron (2014, p.29, fig. Construção).

Cada fase, ao longo do processo de projeto e construção do edifício, solicitou dos projetistas uma análise de viabilidade construtiva, condicionando a maneira de projetar a Arena do Morro. Isso aconteceu, de modo especial, quando a construtibilidade e a modelagem paramétrica foram integradas com a aplicação de *scripts* como ferramenta

otimizadora dos processos de racionalização da geometria do principal elemento do projeto: a parede. Essa integração envolveu os métodos de fabricação do cobogó, mas, sobretudo, a integração entre concepção arquitetônica e estrutural.

Projeto colaborativo

A estrutura organizacional da equipe colaborativa teve dois pólos: o do escritório HdM, baseado na cidade Basiléia, na Suíça, e a equipe local de projetistas, fabricante e empreiteiro, sediada em Natal. A equipe do primeiro pólo contou com quatro arquitetos e, a segunda, teve os projetistas vinculados à empresa Plantae (contendo sete arquitetos, um engenheiro calculista e um engenheiro de instalações prediais), o fabricante da estrutura metálica de cobertura e portas e a empresa empreiteira, representada por dois engenheiros civis.

As reuniões ocorriam sistematicamente a cada mês e variavam de acordo com a disponibilidade dos europeus. Por duas vezes ocorreu em São Paulo, uma vez em Basiléia e as demais em Natal. Toda a equipe participava das reuniões, que tinham pauta lançada com pelo menos uma semana de antecedência. Havia muitos momentos de cooperação entre os projetistas, de acordo com as definições de Kvan (2000, p. 413), uma vez que a maior parte das tarefas era claramente designada pela equipe europeia. Contudo, quando havia um problema de projeto mais complexo, em qualquer que fosse a etapa projetual, esse era lançado para que toda o grupo trouxesse possibilidades de resolução, cuja escolha ficava a cargo do HdM, enquanto líder vertical da equipe. Dessa maneira, ocorria a colaboração, momento em que, segundo Kvan (2000, p. 413), aconteciam negociações entre os participantes, culminando com o que ele define como colaboração efetiva.

A liderança vertical do projeto variava entre o arquiteto entrevistado e a arquiteta brasileira Mariana Vilela, da equipe HdM. Em determinados momentos, essa liderança era horizontalizada para alguns membros da equipe local de projetos, mas retornava aos representantes da equipe HdM logo que desenvolvida alguma solução para problemas cuja *expertise* era de algum membro da equipe local, assim como na conceituação dada por Müller *et al.* (2018, p. 85). Isso fez com que houvesse um processo colaborativo de projeto, apesar da maior predominância das lideranças verticais.

Meios de concepção

No que diz respeito aos meios de projeto aplicados durante o processo, foi possível identificar três tipos: 1) uso de meios analógicos e digitais de concepção; 2) uso de protótipos de escala reduzida, protótipos de escala natural e uso de *mock-ups*; e 3) a obra como ambiente de decisão projetual.

Para produzir os primeiros estudos volumétricos, a equipe HdM utilizou cortes de espuma de alta densidade e colagens de papel (Figura 42). Paralelamente, utilizaram o croqui e desenhos CAD como ferramentas, à medida que eram direcionadas soluções de maior precisão. As ferramentas seguintes foram majoritariamente aplicadas com a finalidade de produzir desenhos bidimensionais. Esses desenhos eram compartilhados entre a equipe como base para a colaboração, e impressos para que neles fossem trazidas soluções desenhadas à mão livre.

Figura 42 – Maquete do edifício em escala reduzida.



Fonte: Herzog&DeMeuron (2014, p.14).

Quando as soluções desenhadas tecnicamente e por croquis já não eram suficientes, foram adicionados novos meios de concepção. De entre eles, a fabricação digital com fresa CNC, para materialização dos cobogós em espuma de alta densidade, e o corte a laser para produzir, em escala reduzida, o edifício completo. Esses cobogós fabricados digitalmente serviram para a checagem de proporcionalidade dos elementos mediante a escala do

usuário, e a maquete do edifício completo ajudou na análise de elementos grandes, como a cobertura.

Dada a complexidade do percurso curvilíneo das paredes e dos blocos de concreto, a atualização de novas alternativas no projeto começou a consumir muito tempo. Esse problema fez com que a modelagem paramétrica fosse adotada, trazendo rápidas atualizações de alternativas a cada vez que o bloco de concreto ou o percurso da parede mudavam, como já descrito no quesito construtibilidade. Contudo, por ter sido uma ferramenta autoral, não foi disponibilizada à equipe local, sendo os estudos de alternativas privativos à equipe HdM.

Depois de definidas as soluções de âmbito geométrico, a equipe suíça solicitou a produção de *mock-ups*, para que fossem verificados os métodos construtivos das soluções propostas, já que muitas soluções eram customizadas e envolviam novas técnicas executivas pela equipe de mão-de-obra.

Duas opções foram cogitadas. Uma delas seria executar uma pequena parte do edifício, na locação exata da futura obra, que seria mantida e se conectaria com o que viria a ser a Arena do Morro. A outra, que acabou sendo escolhida, foi a construção de trechos menores (Figura 43), seu uma localização particular e com simplificações de trechos reais do edifício como, por exemplo, executar módulos estruturais a cada 3,50 metros de distância, ao invés de aplicar a distância real de 5,00 metros. Foram construídos trechos da cobertura, da parede e do piso da arquibancada do futuro edifício. O uso desse recurso possibilitaria também a análise de efeitos e proporções das texturas dos materiais.

Figura 43 – Mock-ups de cobertura, parede e piso.



Fonte: Herzog&DeMeuron (2014, p.18, p.20 e p.16).

Durante o processo de projeto, o uso dos *mock-ups* foi o recurso que permitiu a interação com a obra, mesmo que simulada em pequenos trechos, e subsidiou a análise de

viabilidade construtiva de cada parte do edifício, trazendo maiores contribuições especialmente para soluções customizadas, que ainda não haviam sido testadas em outro contexto construtivo. Segundo o entrevistado, os *mock-ups* serviram para “entender o mercado construtivo local e a edificabilidade, definir detalhes, juntas e interfaces, ajudar a empreiteira a testar a montagem e o sequenciamento da obra”.

Com a quantidade de informações obtidas neste projeto, foi possível listar os seguintes meios de concepção utilizados como ambientes que auxiliaram na tomada de decisões, separados por fase de projeto (Quadro 3).

Quadro 3 – Meios de concepção utilizados pela equipe de projeto do Arena do Morro.

FASES DO PROJETO →	Estudo preliminar	Anteprojeto	Projeto executivo
MEIOS DE CONCEPÇÃO ↓			
Desenho à mão	●	●	●
Modelo físico	●	O	O
Desenhos técnicos	●	●	●
Modelagem geométrica	●	●	●
Prototipagem digital	●	●	●
Modelagem paramétrica	O	●	●
Análise estrutural paramétrica	O	O	O
Modelo BIM	O	●	●
Mock-up	O	●	●

Legendas

Fases de projeto: EP (Estudo Preliminar); AP (Anteprojeto); PE (Projeto Executivo).

Meios de concepção: ● - utilizado; O - não utilizado; ∇- Não identificado

A variedade de meios de concepção foi grande e se alternou em diversos momentos do processo, corroborando o que defende Lebahar (1999, p.45), quando destaca a importância das competências multimeios e multidomínios como mecanismo para simular as soluções projetuais mais adequadas.

2.3 Morpheus Hotel, Macau (Hong Kong, China)

Introdução

O Morpheus Hotel (Figura 44) está inserido em um complexo hoteleiro de grandes proporções, intitulado *City of Dreams*, e está localizado na cidade de Macau, na região administrativa especial chinesa de Hong Kong. O projeto de arquitetura teve autoria do escritório Zaha Hadid Architects (ZHA) e contou com a participação de uma vasta equipe de colaboradores.

A fonte das informações utilizadas para a coleta de dados e desenvolvimento deste capítulo foram: 1) publicação que detalha o produto projetual e parte do processo de projeto González (2018); e 2) seminário da Web, do tipo *Webinar*, mediado por uma representante da fabricante do *software Rhinoceros* Fugier (2017), arquitetos da equipe ZHA e arquitetos da empresa *Front Façade Consultants*, consultores de projetos de fachada. Foram detalhados os processos de projeto e construção do edifício pela equipe multidisciplinar envolvida.

Os discursos dos envolvidos tratam, sobretudo, sobre o processo de projeto e fabricação da estrutura externa do edifício e de seu revestimento. Do vídeo, foram extraídos os discursos da equipe ZHA, representada pela arquiteta e diretora executiva Viviana Muscettola, pelo arquiteto associado Michele Salvi, e pelo projetista sênior Miron Mutyaba. Do lado da empresa *Front Façade Consultants*, o arquiteto Ramon van der Heijden, especialista em projeto computacional, e os arquitetos associados Alan Tai e Evan Levelle. A aplicação de entrevista com membros da equipe, assim como feita com as duas referências anteriores, foi inviabilizada devido à dificuldade de contato com membros do escritório ZHA.

O complexo *City of Dreams* “é um dos resorts de maior magnitude da região, que conta com uma mega estrutura de cassino, dois teatros, ampla área comercial, 20 restaurantes e quatro hotéis” González (2018). Ainda de acordo com a autora:

O Morpheus possui 770 quartos, entre suítes e "sky villas", incluindo espaços públicos, instalações para reuniões e eventos, salas de jogos, um átrio, restaurantes, spa e piscina na cobertura, além de uma enorme área técnica e espaços de apoio González (2018).

O edifício está distribuído em 40 pavimentos e utiliza “dois núcleos internos de circulação vertical, os quais se conectam nos níveis da base e também na cobertura, onde foram implantados diversos espaços coletivos para os hóspedes” González (2018).

Figura 44 – Morpheus Hotel.



Fonte: González (2018, p.1, fig. 1).

O escritório ZHA foi convidado pelo cliente para desenvolver o projeto no ano de 2012. A etapa de projeto se estendeu até 2014, perfazendo um período total de dois anos, envolvendo planejamento e projeto. A obra foi iniciada em 2014 e perdurou até 2018, totalizando quatro anos de execução.

É uma obra construída predominantemente em estrutura metálica. Segundo Beorkrem (2013, p. 74) as chapas metálicas são materiais comumente aplicados em composições paramétricas de projeto, por sua flexibilidade e simplicidade de manipulação por máquinas cortadoras de plasma, a laser ou a jato de água. As restrições predominantes no uso desse material são, portanto, a disponibilidade de maquinário com tecnologia adequada para reproduzir partes do edifício de modos personalizados.

Problema de projeto

A combinação entre a pesquisa acadêmica e a prática é comum em grandes escritórios de arquitetura. No caso do escritório ZHA, uma delas descreve a relação entre

modelo cognitivo, método de projeto e modelo de processamento de informações críticas para uma busca colaborativa e eficaz por soluções para problemas arquitetônicos Bhooshan (2017). Por essa e outras razões, a pesquisa em projeto exerce um papel fundamental na obra do escritório. A seguir, será descrito como se deu o sequenciamento dos problemas de projeto ao longo do processo de projeto do Morpheus Hotel, destacando como a condução reflexiva e investigativa dos problemas de projeto pôde contribuir ao longo do processo.

A equipe do escritório ZHA foi admitida para desenvolver o projeto do hotel em um terreno para o qual já havia sido desenvolvido o projeto de uma torre de apartamentos. Como o projeto residencial multifamiliar foi abandonado no início da obra, as fundações já haviam sido executadas. O desafio inicial do projeto considerado pela equipe ZHA foi, portanto, considerar restrições projetuais de pré-existência relativas ao posicionamento do edifício e seu perímetro, uma vez que o alto investimento já feito não seria desconsiderado pelo cliente.

Em seu partido arquitetônico, a equipe de projeto se inspirou nas tradicionais esculturas chinesas em jade e suas formas fluídas. Desse modo, a forma do edifício foi concebida como:

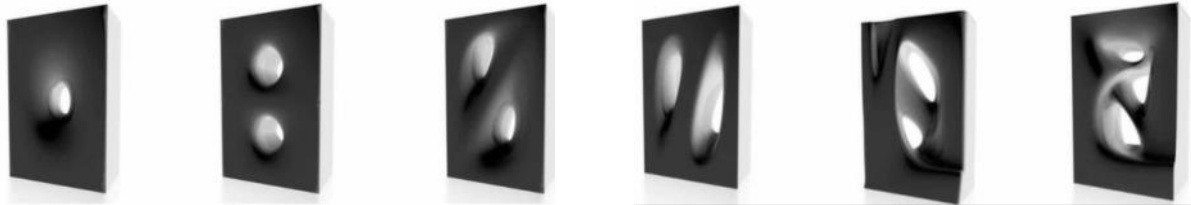
Uma extrusão vertical da planta retangular do terreno com **diversos vazios esculpidos em seu interior**, criando uma "janela urbana" que conecta os espaços comuns do interior do hotel com a cidade e geram formas escultóricas que definem a arquitetura dos seus espaços públicos González (2018).

Dito de outra maneira, a forma retangular disponível para construção tinha dimensões de 50 por 100 metros, e foi “extrudada” para criar um prisma de base retangular. A envoltória desse prisma foi esculpida, testando diversas alternativas de vazios que poderiam ser aplicados na forma inicial. Por considerar a simbologia de tradicionais esculturas chinesas, mais uma restrição de projeto surgiu: a simbólica. As restrições práticas (de pré-existência) e simbólica foram, portanto, integradas nas fases iniciais do projeto, quando da definição do partido arquitetônico.

Não obstante, a equipe de projeto teve que resolver um complexo programa de necessidades lançado pelo cliente, que foi distribuído em um volume único de 40

pavimentos. Foram acomodados ao todo 20 elevadores e 780 apartamentos, entre outros ambientes de uso comum, apoio e serviço. Apesar de ter um único volume, o programa do projeto foi distribuído em duas colunas, interligadas pelos trechos cheios gerados pelos vórtices centrais (Figura 45).

Figura 45 – Estudos volumétricos conceituais do Morpheus Hotel.

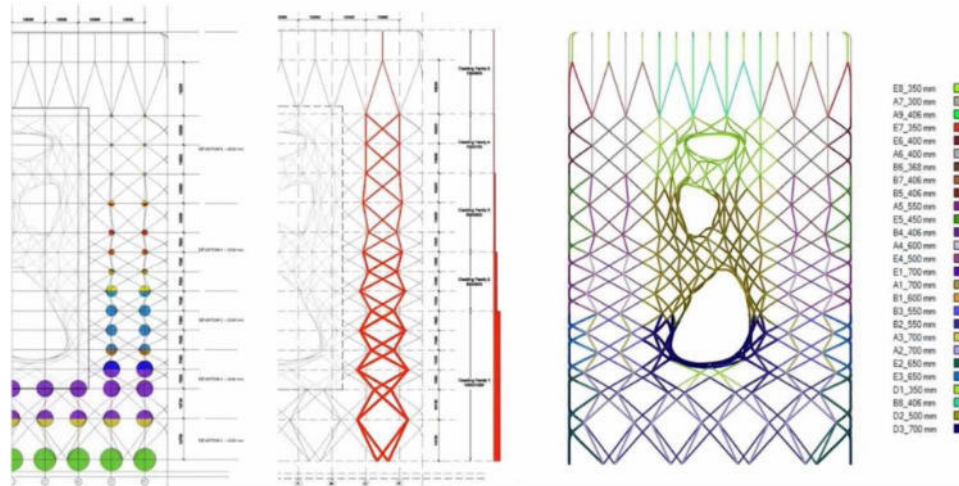


Fonte: Adaptado de Fugier (2017).

De acordo com uma das publicações González (2018), o Morpheus Hotel é considerado “o primeiro edifício com exoesqueleto estrutural e planta livre do mundo, em que o padrão estrutural da fachada vai progredindo dos níveis inferiores para cima, criando uma rede menos densa e cada vez mais leve à medida que se aproxima da cobertura”. Esse efeito expressa a tectônica do edifício, uma vez que a estrutura mais densa e pesada está na base, refletindo a sobrecarga recebida pelo acúmulo de carga que os pavimentos mais baixos recebem. As restrições da engenharia estrutural ficaram, assim, estampadas na forma do exoesqueleto (Figura 46).

Apesar das diversas restrições consideradas ao longo do processo de projeto, o problema esteve, em sua maior parte, centrado na integração entre a forma livre do edifício, exoesqueleto estrutural, sistema de revestimento da fachada e suas esquadrias.

Figura 46 – Regras estruturais do exoesqueleto do Morpheus Hotel.



Fonte: Fugier (2017).

Através da interpretação das publicações utilizadas foi possível identificar que as seguintes restrições projetuais estiveram presentes durante o processo de projeto do Morpheus Hotel: 1) prática (locação e perímetro do edifício) – consideração de fundações pré-existentes; 2) simbólica – forma de esculturas de rubi chinesas; 3) prática (função) – distribuição de um complexo programa de necessidades em 40 pavimentos; e 4) prática (construtiva) – integração dos sistemas estrutural e de fachada à forma complexa do edifício.

Construtibilidade

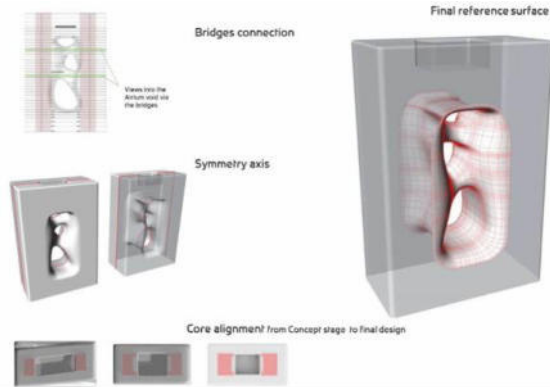
Reivindicado pelo escritório ZHA como o primeiro arranha-céu estruturado por um exoesqueleto de forma livre, o Morpheus Hotel apresentou, por essa razão, inúmeros desafios construtivos para a equipe de projetistas e construtores envolvida. O caminho encontrado pelo escritório ZHA para viabilizar esse desafio foi gerar, de modo integrado e contínuo, uma modelagem tridimensional que surgiu do projeto conceitual e perdurou até a fabricação final, integrando estrutura, fachada e seus revestimentos, de acordo com a arquiteta Viviana Muscettola.

A metodologia do projeto descrita pela arquiteta, pensando na construção, envolveu a compreensão das restrições construtivas: estrutura, fabricação, custo, tempo e manutenção. A partir delas, e do modelo geométrico criado no *software Rhinoceros*, temos a seguinte sequência: criação de regras, criação de parâmetros e manipulação desses parâmetros em pequenos recortes de superfície da fachada do edifício. À medida que o projeto ganhou definição dessas etapas anteriores, veio a fase final de projeto, com a racionalização geométrica e a validação do modelo proposto, através de ferramentas paramétricas (FUGIER, 2017).

As análises de viabilidade construtiva da forma proposta iniciaram-se com a racionalização geométrica da envoltória proposta no projeto conceitual (Figura 47 e Figura 48). Dessa maneira, foi possível compatibilizar a forma à distribuição de *layout* dos pavimentos, pontes de conexão, eixos de simetria e alinhamento do núcleo de circulações verticais e espaços de serviço. O uso do exoesqueleto estrutural foi adotado para gerar máxima flexibilidade do programa arquitetônico, de acordo com a arquiteta Viviana

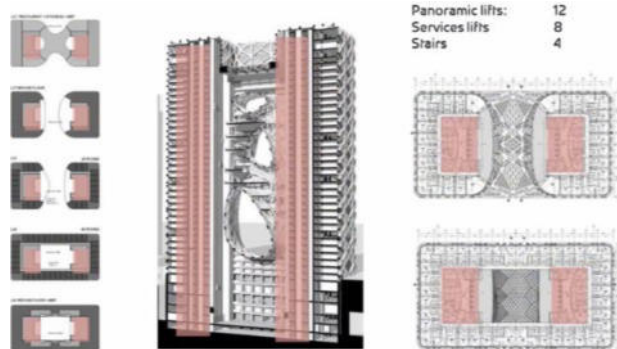
Muscettola (FUGIER, 2017), mostrando uma integração entre a tectônica do projeto e as restrições funcionais.

Figura 47 – Racionalização do vazio central do Morpheus Hotel.



Fonte: Fugier (2017).

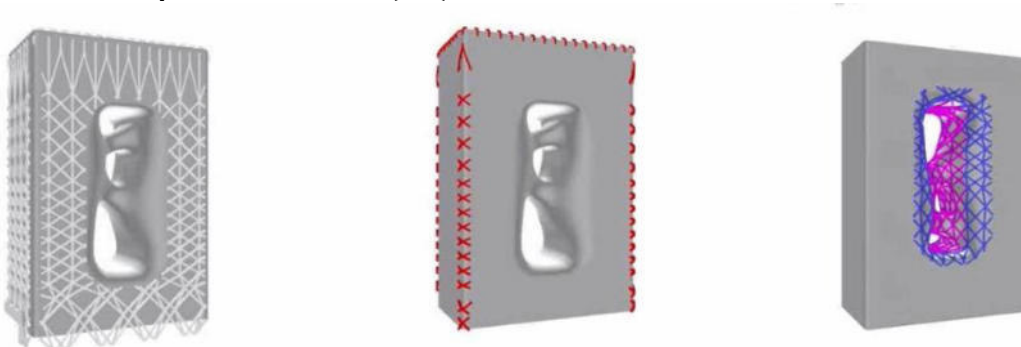
Figura 48 – Núcleos de circulação e serviços do Morpheus Hotel.



Fonte: Fugier (2017).

O *grid* do envelope foi a primeira tarefa realizada em ambiente colaborativo. O exoesqueleto sustenta a fachada de forma livre e as lajes, estas últimas também apoiadas pelos pilares contidos nos núcleos. A fachada foi dividida em quatro tipos de componentes de exoesqueleto: áreas planas, áreas de curvatura simples, áreas de forma livre facetadas e de duas curvaturas (Figura 49).

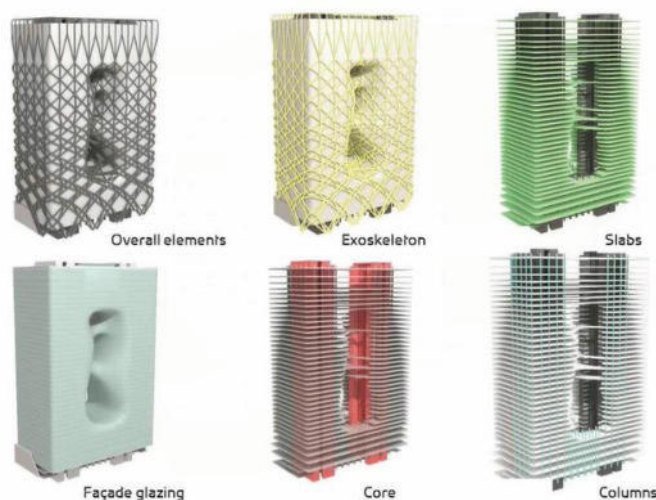
Figura 49 – Elementos de fachada planos (esq.), de curvatura simples (centro) e de forma livre facetados e duplamente curvados (dir.).



Fonte: Fugier (2017).

Os componentes construtivos resultantes da segmentação dos trechos de fachada surgiram depois da determinação dos processos de racionalização da mesma. Os principais elementos construtivos do projeto foram o exoesqueleto, as lajes, os núcleos (espaços de circulação vertical e áreas técnicas), os pilares e a pele de vidro da fachada (Figura 50).

Figura 50 – Elementos construtivos principais do Morpheus Hotel.



Fonte: Fugier (2017).

A primeira tarefa das equipes de arquitetura e engenharia estrutural foi estabelecer o procedimento correto para acomodar a forma pensada à estrutura. As regras estruturais surgiram a partir desse primeiro equacionamento entre o conceito do projeto e as possibilidades construtivas existentes. Para cada uma das quatro categorias diferentes de superfícies da fachada, foram estabelecidas regras construtivas que guiariam a modelagem paramétrica e as análises estruturais.

Para as superfícies planas, ficou estabelecido que: 1) todos os nós deveriam ser alinhados horizontalmente à viga de borda do pavimento; 2) o alinhamento de todas as ancoragens conectoras do exoesqueleto à fachada deveria ser perpendicular à superfície de referência da cortina de vidro; e 3) os nós do *grid* da fachada aos níveis dos pavimentos. Para as superfícies facetadas, as mesmas regras foram aplicadas, adicionando que os alinhamentos das ancoragens conectoras (peças que conectam as esquadrias à estrutura) também seriam posicionados na perpendicular em relação à cortina de vidro. Nas superfícies de fachada de forma livre, todos os elementos deveriam ser recortes de materiais planos ou de curvatura simples.

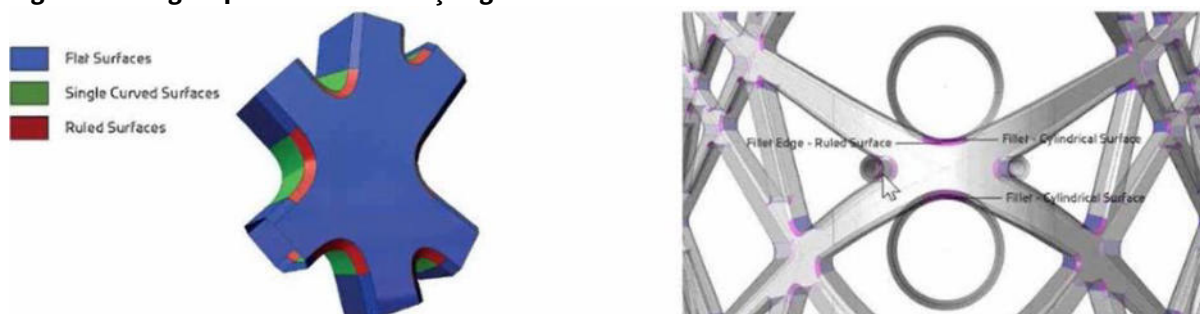
Dada a vasta quantidade diferente de nós estruturais do projeto, muitos *mock-ups* foram feitos. O primeiro deles teve o propósito de checar, entre outros aspectos, a proporção, a efetividade da conexão entre o exoesqueleto e a laje, e a facilidade de fabricação dos elementos metálicos (Figura 51).

Figura 51 – Primeiro Mock-up de nó estrutural do Morpheus Hotel.

Fonte: Fugier (2017).

Depois de definidas as regras estruturais, deu-se início ao desenvolvimento do revestimento da estrutura, composto de chapas de alumínio conectadas à estrutura. Esses revestimentos não tinham função estrutural nem de vedação, servindo apenas para dar um envelopamento à estrutura, combatendo a sua oxidação e desgaste. O arquiteto Michele Salvi declarou que a conexão entre o exoesqueleto e esse revestimento foi o maior desafio do projeto, apontando que foi possivelmente a **restrição radical** do processo de projeto do Morpheus Hotel.

As regras definidas para a criação do revestimento da estrutura determinaram que não poderia haver trechos de superfícies com dupla curvatura, pela dificuldade de fabricação envolvida nesse processo. Com isso, os nós e elementos ficaram restritos ao uso de superfícies planas, de curvatura simples e de revolução (Figura 52).

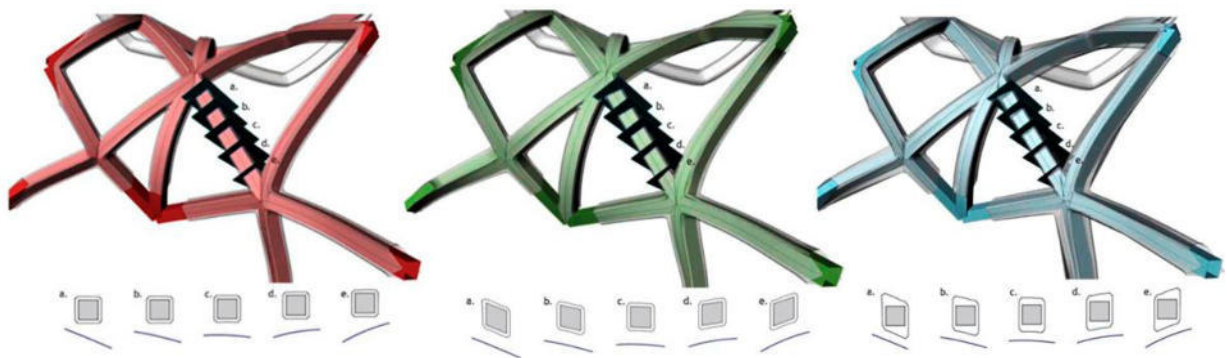
Figura 52 - Regras para a racionalização geométrica do revestimento.

Fonte: Fugier (2017).

Foram ponderadas três abordagens possíveis para o revestimento de fachada. A opção 01 considerou que as superfícies deveriam acompanhar o corpo do elemento estrutural de perfil quadrado. Porém, geraria uma grande complexidade de projeto e execução dos nós, além de produzir desalinhamento do revestimento em relação à cortina

de vidro. Dessa maneira, a equipe de projeto e fabricação mudou para a abordagem 02, que incluiu como regra o paralelismo da estrutura e do revestimento em relação à cortina de vidro. Contudo, a ideia foi abandonada, porque cortar diferentes perfis de aço traria um custo exorbitante para a obra. A abordagem 03, escolhida para ser implementada, combinou o formato retangular dos perfis da estrutura de aço da abordagem 01 com o paralelismo do revestimento em relação à cortina de vidro presente na abordagem 02 (Figura 54). Isso significou uma combinação simplificada de otimização do consumo de aço da estrutura e facilitação de fabricação do revestimento.

Figura 53 - Abordagens 1 (esq.), 2 (dir.) e 3 (dir.) da relação entre revestimento e exoesqueleto estrutural.



Fonte: Fugier (2017).

Depois de estabelecidas as regras de criação do exoesqueleto estrutural, a superfície do modelo geométrico conceitual foi transformada em uma malha (*mesh*) topológica, criada em ferramenta paramétrica, com o intuito de possibilitar a atualização do modelo final cada vez que fosse necessária alguma calibração no modelo geométrico. Os dados de saída da malha topológica resultaram em três modelos paramétricos, compartilhados com os colaboradores. Eles serviram como base de discussão e evolução do projeto (Figura 55).

Figura 54 - Mock-ups do revestimento e estrutura (esq.) e da estrutura, revestimento e cortina de vidro (dir.).

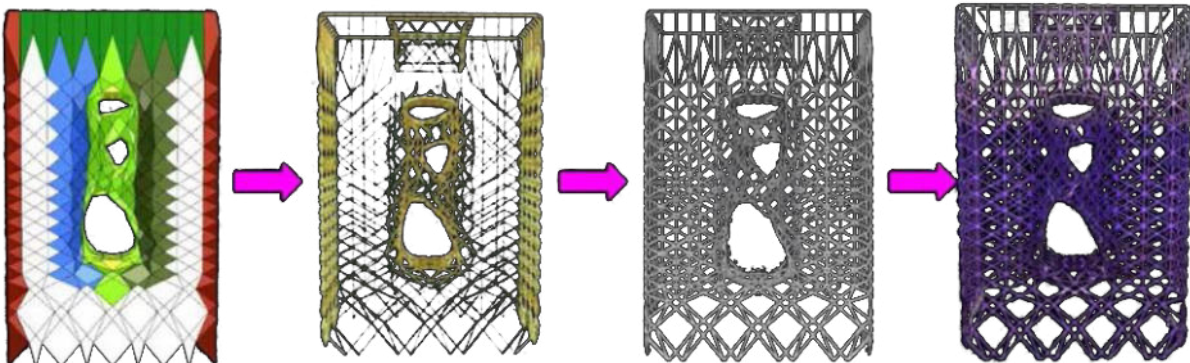


Fonte: Fugier (2017).

O primeiro dos modelos continha os centros geométricos dos nós estruturais, os eixos dos perfis estruturais e os planos de referência da estrutura, enquanto o segundo possuía o modelo da envoltória. Esses modelos foram fornecidos para a equipe de engenharia estrutural. O último modelo paramétrico gerado pela equipe ZHA continha apenas as superfícies de revestimento de alumínio, que foram base para discussão e desenvolvimento do projeto do revestimento de fachada pela *Front*.

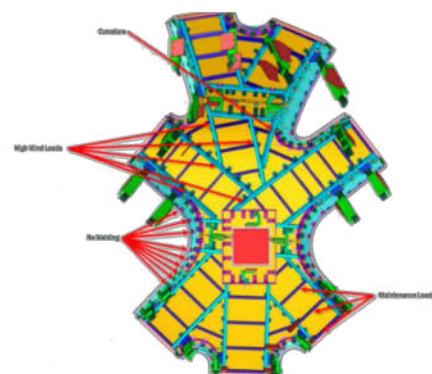
O trabalho dos consultores da *Front* foi elaborar o sistema de subestrutura para fixação das chapas de alumínio da fachada, projetadas pela equipe ZHA (Figura 56), especificamente nos trechos que continham superfícies duplamente curvadas.

Figura 55 - Modelos paramétricos criados e compartilhados pela equipe ZHA com os colaboradores.



Fonte: Fugier (2017).

Figura 56 - Subestrutura de suporte das chapas de alumínio em um nó estrutural do projeto.



Fonte: Fugier (2017).

A *Front* não teve liberdade de solicitar alterações no projeto de estruturas, uma vez que as regras já haviam sido definidas em colaboração entre ZHA e Buro Happold (escritório de engenharia estrutural). Além da complexidade geométrica envolvida nos encaixes, a equipe teve que considerar restrições adicionais como altas sobrecargas de vento da região

e a não utilização de solda nos contatos. Esse conjunto de variáveis teve um alto impacto na montagem do modelo final e na forma do edifício.

As milhares de chapas de alumínio necessárias para cobrir todo o exoesqueleto tiveram de ser fabricadas digitalmente, dada a sua customização e irregularidade geométrica. A fabricação digital de outros componentes do edifício, como a cortina de vidro e a estrutura de aço, foi feita por cinco empreiteiras diferentes, e os encontros entre os membros das equipes aconteceu, na maior parte das vezes, por videoconferência. A fabricação das chapas de revestimento teve um processo que contou com uma máquina CNC especial, que possibilitava o corte das chapas perpendicularmente à superfície. Em seguida, depois de cortada, passou por um processo de pré-torção em uma calandra, sendo finalizada em um processo mais rudimentar, em que o peso de um operário conectava a chapa a um molde, ao mesmo tempo em que outro operário soldava a chapa ao molde (Figura 57).

O processo combinou, portanto, recursos de altíssima tecnologia com mão-de-obra e ferramentas rudimentares, mostrando a importância da exploração de multimeios também durante o processo de construção, assim como foi o de projeto.

Figura 57 – Processo de fabricação do revestimento de alumínio.



Fonte: Fugier (2017).

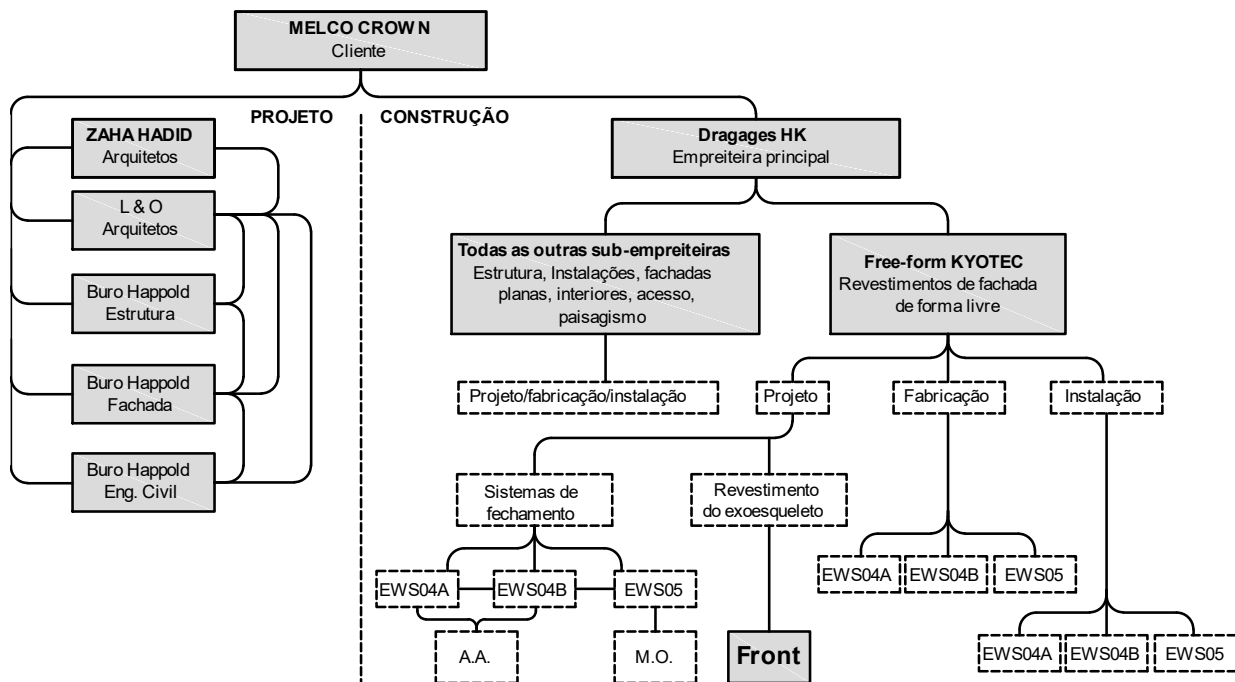
Dada a magnitude do edifício, a equipe de construção contou com 600 pessoas no canteiro/estaleiro de obras, 100 produzindo os revestimentos planificados, 70 fabricando os revestimentos de dupla curvatura, e 80 fabricando as esquadrias. Esse grande número de operários foi envolvido em um processo de fabricação sem precedentes, e precisou de alto nível de coordenação para a realização das tarefas. Isso resultou em um edifício com grande uniformidade dos diversos tipos de fachada apresentados (plana, de curvatura simples, facetada e duplamente curvada). Isso significa que a geração da forma e sua materialização tiveram que seguir a constante integração entre **geometria** e **construção**,

combinando restrições de manufatura, logística de montagem e características dos materiais e sistemas construtivos, conforme indicado na literatura (MENGES, 2011, p.199).

Projeto colaborativo

O nível de complexidade formal e construtiva, associado ao tamanho do edifício, fez com que fosse necessário o envolvimento de uma vasta equipe de especialistas mundialmente reconhecidos por suas competências. A equipe de projeto e execução do edifício contou com dezenas de empresas (Figura 58), cada uma concentrando diversos profissionais, em quatro diferentes cidades ao redor do mundo: Las Vegas (Estados Unidos), Londres (Reino Unido), Shenzhen (China) e Macau (Região administrativa especial da China).

Figura 58 – Distribuição das equipes de projeto e construção.



Fonte: Adaptado de Fugier (2017).

Em função de as principais restrições de projeto do edifício terem sido a formal e a construtiva, consumindo a maior parte do tempo da equipe, foi dada atenção especial no processo colaborativo de projeto às interações ocorridas entre os profissionais do projeto de arquitetura (ZHA), o escritório responsável pelo projeto da estrutura (Buro Happold) e os consultores de fachada (*Front Façade Consultants*). Os participantes relataram, na principal publicação que subsidiou esta descrição, como a tecnologia e o modelo paramétrico afetaram cada fase do projeto.

Apesar da alta integração entre as equipes, a divisão de tarefas foi feita entre elas, dada a alta *expertise* de cada participante em nichos de conhecimento específicos de projeto e execução. O escritório ZHA ficou responsável pela definição geral de *layout* do exoesqueleto, pela paginação das chapas do revestimento de fachada e pela racionalização geométrica da estrutura; a equipe Buro Happold desenvolveu o dimensionamento do exoesqueleto e a racionalização do nó estrutural; e a equipe da *Front Façade Consultants* fez o projeto dos suportes das chapas do revestimento de fachada. Nessa condição, o trabalho tinha muitos momentos de cooperação, quando cada equipe desenvolvia tarefas de modo isolado, seguida de uma integração colaborativa através de videoconferências ou *workshops* presenciais. Essa estrutura organizacional da equipe e suas interações mostraram um fluxo de trabalho semelhante ao que Kvan (2000, p. 413) descreve como o real processo colaborativo, quando há momentos de cooperação entre os membros da equipe, seguidos de mediação e negociação em momentos específicos.

Baseado no tipo de interação entre os membros da equipe, também foi possível identificar a presença de liderança vertical do escritório ZHA, enquanto responsáveis técnicos pelo projeto arquitetônico, mas ficando claro que houve, em muitos momentos, a alternância para a liderança horizontal, a depender do grau de especialidade dos colaboradores, como descrevem Müller *et al.* (2018, p. 85).

Meios de concepção

Não foi possível identificar todos os meios de concepção durante o processo de projeto, apenas os descritos pelos profissionais nas publicações. Entretanto, ao explicar determinadas soluções do projeto, os profissionais tomaram partido de diversos de meios de concepção, detectados por fases de desenvolvimento do projeto.

A forma inicial, gerada por modelagem geométrica, contou com o auxílio do *TSpline*, um *plug-in* do *Rhinoceros* que possibilita a modelagem de formas orgânicas livres. Esse recurso é muito usado por escultores. A partir dessa forma inicial, intitulada de modelo geométrico de referência, outras ferramentas foram aplicadas, predominantemente as paramétricas. Segundo a arquiteta Viviana Muscettola, “muito tempo foi gasto com a alimentação de todos os possíveis detalhes construtivos em um modelo único. Mas, graças ao investimento deste tempo no modelo paramétrico, foi possível a otimização de tempo

na fabricação precisa dos elementos, assim como na seleção de alternativas de projeto” (FUGIER, 2017).

Trabalhar unicamente com modelos geométricos (não paramétricos) não foi uma opção viável, considerando o nível de complexidade do projeto, segundo o arquiteto Miron Mutyaba. Com o modelo paramétrico, era possível gerar, em cinco horas de processamento de geometria (*bake geometry*), mais de 2.500 perfis estruturais, 1.000 nós e 1.600 conectores. O mesmo trabalho consumiria aproximadamente 30 dias de modelagem geométrica. Isso possibilitou à equipe analisar diferentes alternativas a partir de uma gama de diferentes abordagens, sem ter que esperar um mês pelos resultados. Um modelo poderia passar a noite processando e entregar resultados no dia seguinte de trabalho.

Para um edifício dessa escala e complexidade, **o uso de modelos BIM tradicionais também não foi uma opção viável**. Por se tratar de um edifício cujo processo de construção trouxe soluções altamente customizadas, inúmeras de rotinas, *plug-ins* e *add-ons* foi utilizada para facilitar o trabalho dos projetistas.

A primeira delas foi a criação de uma rede de modelos computacionais ligados uns aos outros pela ferramenta *Elefront*, um *add-on* para o *plug-in Grasshopper*, criado por dois especialistas da *Front*. Essa rede de modelos continha diversos arquivos do *Rhinoceros* e *Grasshopper* interconectados, cada um dando uma solução específica para trechos distintos do edifício. Por ser composta de diversos arquivos diferentes, essa rede abriu frentes de trabalho para diversos colaboradores. Foi possível, para cada colaborador, visitar etapas distintas do modelo paramétrico. Outra vantagem é que, otimizando o processamento de dados altamente complexos, haveria menos necessidade do uso de computadores com alto poder de processamento.

O segundo recurso personalizado que facilitou o trabalho da empresa consultora de fachadas foi a criação de um *link* direto entre o *Grasshopper* e o *software* de análise estrutural de elementos finitos utilizado por eles. Esse *link* possibilitou uma integração contínua dos modelos, poupando toda a equipe de trabalhos repetitivos durante o processo e ajudando a validar, estruturalmente, as soluções geométricas propostas. Isso incluiu, sobretudo, os mais complexos nós estruturais do projeto (Figura 59).

A solução de subestrutura dos revestimentos de fachada foi criada em ambiente computacional, por algoritmos, aos milhares. Como os projetistas não visualizaram todas as milhares soluções, para dar mais segurança, desenvolveram uma rotina algorítmica capaz de capturar imagens de cada um dos nós estruturais do projeto, fazendo com que um catálogo dessas imagens fosse disponibilizado para qualquer pessoa da equipe de projeto e construção. O objetivo foi gerar um material de validação para a equipe, independentemente do nível de habilidades em ferramentas computacionais, para que fosse detectado qualquer erro antes do envio à fabricação.

Para gerar os arquivos destinados à fabricação digital e à documentação dos desenhos de cada um dos elementos complexos, foram criados 350.000 desenhos gerados automaticamente, utilizando ferramentas paramétricas automatizadas, nomeadamente o *Grasshopper* e o *Elefront*, em um total de um milhão de peças de diferentes dimensões.

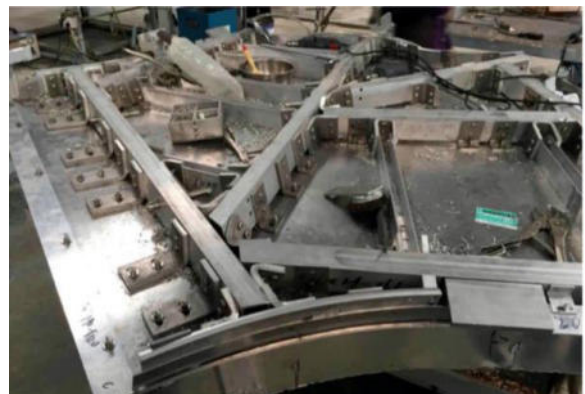
Em resumo, o modelo paramétrico foi usado para refinar a forma arquitetônica, analisar a integridade estrutural e fabricar diferentes componentes da fachada. Viabilizou, também, de maneira inovadora, a fabricação digital dos elementos de revestimento metálico e das esquadrias em tempo recorde. Por fim, foi também uma ferramenta que possibilitou a rápida geração de desenhos técnicos de alta complexidade, especialmente os cortes e fachadas (Figura 61).

Figura 59 – Processo de montagem da subestrutura da chapa de alumínio da fachada do Morpheus Hotel.

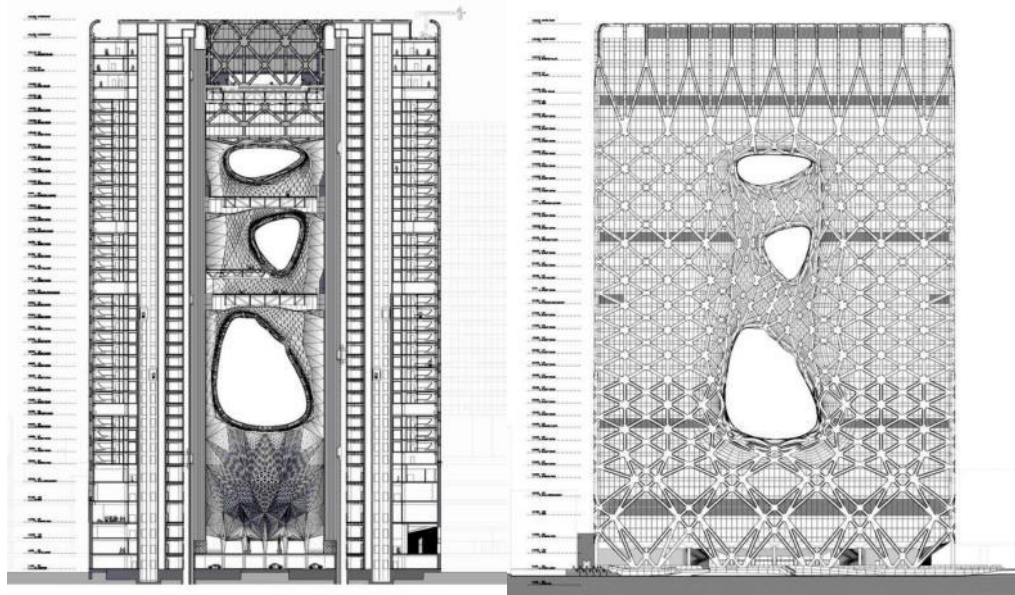


Fonte: Fugier (2017).

Figura 60 – Fabricação da chapa de alumínio em fresadora CNC.



Fonte: Fugier (2017).

Figura 61 – Corte longitudinal (esq.) e fachada frontal (dir.) do Morpheus Hotel.

Fonte: González (2018).

De todas as referências apresentadas, o Morpheus Hotel foi o que apresentou maior incidência do uso da modelagem paramétrica como meio de concepção da forma e como ambiente de realização de análises estruturais (Quadro 4).

Quadro 4 – Meios de concepção utilizados pela equipe de projeto do Morpheus Hotel.

FASES DO PROJETO → MEIOS DE CONCEPÇÃO ↓	Estudo preliminar	Anteprojeto	Projeto executivo
Desenho à mão	▽	▽	▽
Modelo físico	▽	▽	▽
Desenhos técnicos	O	●	●
Modelagem geométrica	●	●	O
Prototipagem digital	●	●	●
Modelagem paramétrica	●	●	●
Análise estrutural paramétrica	●	●	●
Modelo BIM	O	O	O
Mock-up	O	●	●

Legendas

Fases de projeto: EP (Estudo Preliminar); AP (Anteprojeto); PE (Projeto Executivo).

Meios de concepção: ● - utilizado; O - não utilizado; ▽ - Não identificado

Destacaram-se, como principais meios de concepção, as ferramentas paramétricas, os *mock-ups* e a prototipagem digital. Isso denota uma alta incorporação de tecnologia de ponta no processo de projeto combinada a diversas simulações de canteiro/estaleiro de obras por meio de *mock-ups*.

2.4 Considerações sobre o capítulo

As três referências empíricas apresentadas mostraram a aplicação do projeto paramétrico em três escalas de edifício, apresentando complexidades da forma e de soluções construtivas distintas. O porte - ou escala - crescente dos edifícios determinou a ordem de apresentação dos projetos.

O **Toledo Gridshell** tomou partido da modelagem paramétrica como recurso exclusivo utilizado na geração da forma. Os principais benefícios de sua aplicação foram possibilitar a geração da forma, por meio de técnica *form-finding*, e a incorporação de diversos dados de comportamento mecânico e construtivo dos materiais no modelo paramétrico. Isso fez com que a integração entre a geração da forma e a incorporação de restrições construtivas acontecesse simultaneamente. A integração, portanto, de complexas informações da técnica construtiva de uma Gridshell pós-formada ao modelo paramétrico, antes da descoberta da forma do objeto arquitetônico, contribuiu para a sistematização do processo como um todo, em que restrições formal e construtiva se conectaram. Essa unificação só foi possível, contudo, graças à grande *expertise* da equipe em projetos anteriores da mesma tipologia arquitetônica, trazendo consigo as soluções construtivas dessas experiências prévias. Assim, pode-se afirmar que a hipótese lançada foi confirmada.

O projeto da **Arena do Morro** aplicou o recurso para racionalização geométrica da fachada. Os principais benefícios dessa aplicação foram a rapidez na geração de alternativas, embasando tomadas de decisões no tocante ao projeto de estruturas e na fabricação dos cobogós; a otimização dos blocos de concreto, evitando perdas e facilitando a sua conexão com a estrutura de concreto; e, por último, a velocidade de documentação dos desenhos do projeto executivo. Apesar de a forma não ter sido originada com o recurso da modelagem paramétrica, sua relativa complexidade fez com que as questões construtivas assumissem caráter de restrição radical e a ferramenta paramétrica foi utilizada como impulsionadora do processo construtivo do edifício. Desse modo, pode-se afirmar que a hipótese lançada se confirmou no caso analisado, uma vez que os problemas de natureza construtiva foram priorizados desde as fases iniciais.

Apresentado aqui como o mais complexo dos projetos analisados, o **Morpheus Hotel** utilizou a modelagem paramétrica, inicialmente, como recurso que ajudou a definir a forma de partida do exoesqueleto estrutural, interferindo diretamente na aparência do edifício. A tipologia estrutural do edifício trouxe consigo peculiaridades de natureza extremamente complexa. A decisão de usar um exoesqueleto estrutural em uma edificação tão alta trouxe consigo desafios que necessitavam de alta tecnologia de projeto e construção, exigindo muito esforço e integração das equipes envolvidas. Como resultado, o fluxo de trabalho das equipes exigiu a utilização ferramentas paramétricas como tecnologia obrigatória no processo de projeto e construção, ajudando especialmente a resolver problemas inerentes à estrutura metálica e ao revestimento da fachada, que cobria a estrutura e servia de encaixe para o sistema de cortina de vidro.

No que se refere às relações entre **geometria e construção** ao longo da projeção, observou-se que os três casos estudados tiveram estreita relação entre essas duas variáveis. No tocante à construtibilidade das superfícies dos três projetos, observou-se que o Toledo Gridshell, por ter sua superfície contínua, em que a curvatura é dada pelo próprio material construtivo, não desencadeou processos de otimização da forma, sendo desnecessária a etapa de pré ou pós-racionalização geométrica. Já os projetos da Arena do Morro e do Morpheus Hotel mostraram processos constantemente integrados entre geometria e construção, observados desde a etapa de criação das suas superfícies de fachada. Desse modo, pode-se concluir que os três projetos combinaram geometria e construção desde o início da projeção. Isso mostra como os projetistas foram além do conhecimento básico em geometria, apresentando um saber mais profundo dessa área da matemática para conseguirem dirimir a complexidade dos projetos e das técnicas construtivas envolvidas, conforme indica Pottman (2010, p. 74).

Os três projetos apresentaram estratégias específicas para os seus **fluxos digitais de trabalho**, ou *workflow* metodológico do projeto computacional. No processo de projeto do Toledo Gridshell, podemos destacar a incorporação de aspectos de comportamento físico dos materiais a um fluxo digital claramente guiado por um fluxograma próprio, que pode ser aplicado para projetos futuros de mesma tipologia. Apesar de terem escalas diferentes, os processos de projeto da Arena do Morro e do Morpheus Hotel tiveram um fluxo digital de

trabalho semelhante, aliando diversos *softwares* computacionais a *mock-ups* como ambiente de tomada de decisões. Assim, as equipes colaborativas integraram constantemente aspectos físicos aos seus fluxos digitais de trabalho, explorando a prototipagem e interações rápidas, apontadas por Resnick (2017, p. 126) como elementos potencializadores da tomada de decisões.

Esses fluxos foram constantemente alimentados por pesquisas extremamente aprofundadas dos problemas de projeto colocados para as equipes, sobretudo no que diz respeito à dimensão material dos edifícios. Essas pesquisas tiveram forte integração com a experiência advinda da prática projetual, mudança de paradigma cada vez mais presentes em projetos computacionais, como constata Hensel e Nilsson (2019, pp.1-12).

Celani e Lenz (2014) denominam a busca pela materialização de formas arquitetônicas complexas como integração entre arquitetura e fabricação digital. Como nem todas as soluções analisadas neste capítulo utilizam máquinas controladas computacionalmente, suprimimos o termo digital. Para os projetos analisados (Quadro 5), observou-se que todos adotaram soluções *in-house*, mas no caso do Morpheus Hotel, houve integração da equipe interna ZHA com a consultoria especializada *Front Façade Consultants*. O projeto do Toledo Gridshell mostrou que não havia equipe especializada, uma vez que os projetistas detinham o conhecimento nas ferramentas digitais, enquanto no escritório Herzog & DeMeuron há uma equipe interna especializada, que atende às diversas solicitações, de diversas frentes de projeto do escritório.

Quadro 5 – Enquadramento dos estudos empíricos nas categorias de Celani e Lenz (2014).

REFERÊNCIAS EMPÍRICAS →			
INTEGRAÇÃO ENTRE ARQUITETURA E FABRICAÇÃO ↓	Toledo Gridshell	Arena do Morro	Morpheus Hotel
Soluções <i>in-house</i>	●	●	●
Serviços oferecidos pelas indústrias	O	O	O
Consultorias especializadas	O	O	●
Legendas: ● - utilizado; O - não utilizado; ∇- Não identificado			

Cabe adicionar que, em nenhum dos casos, a plataforma BIM, potencialmente facilitadora de processos colaborativos, foi adotada. Pressupomos que isso ocorreu em razão das limitações trazidas na customização dos projetos, conforme declarado no discurso de um dos projetistas consultores da consultoria *Front*.

Os desafios de execução da fachada, sem precedentes semelhantes na arquitetura contemporânea, fizeram da restrição construtiva a principal base do processo de projeto. A incorporação dos métodos de fabricação e a execução do modelo paramétrico foram, nesse sentido, a principal estratégia para superar essas dificuldades. Face ao exposto, esse projeto foi o que pôde confirmar com maior ênfase a hipótese lançada.

Quadro 6 – Enquadramento dos estudos empíricos na hipótese lançada.

REFERÊNCIAS EMPÍRICAS →	Toledo Gridshell	Arena do Morro	Morpheus Hotel
Status da hipótese lançada	△	△	△
Legenda: △ Hipótese confirmada ; ▷ Hipótese confirmada parcialmente ; ▽ Hipótese não confirmada			

Assim, a hipótese lançada foi atestada em todas as referências empíricas analisadas. Fatores como a experiência no uso das ferramentas paramétricas parecem ter tido um peso significativo quando da sua integração ao processo de projeto. Na época em que cada projeto foi desenvolvido e construído, as equipes tinham experiência com modelagem paramétrica há seis meses (*Gridshell.it*), quatro anos (Herzog & DeMeuron), e vinte anos (Zaha Hadid Architects). É factível concluir que a combinação entre esse conhecimento adquirido previamente e a experiência dos projetistas em tecnologias construtivas foi o fator de maior impacto para a confirmação da hipótese lançada. Estas também serão submetidas a averiguação no capítulo de análise dos experimentos de projeto realizados, apresentado a seguir.

3 EXPERIMENTOS DE PROJETO

Com o intuito de testar a hipótese desta tese de doutorado/doutoramento, foram realizados dois experimentos de projeto. Eles assemelham-se, em escala, ao projeto do Toledo Gridshell, primeiro estudo empírico apresentado no capítulo anterior. Escolhemos esse porte de projeto para os experimentos por perceber que haveria maior facilidade de engajar os participantes (devido ao curto tempo de duração), e por não envolver questões de maior complexidade como conforto térmico, programas de grande complexidade, integração com o meio urbano, entre outras questões. Projetos maiores requisitariam equipes multidisciplinares maiores, trabalhando voluntariamente, e possivelmente recursos financeiros, um limitante para o estudo. A interferência desses últimos aspectos citados estiveram presentes nos processos de projeto da Arena do Morro e do Morpheus Hotel.

O Experimento 01, intitulado Oficina de Projeto Paramétrico, foi realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), na cidade de Natal/Brasil, com profissionais projetistas brasileiros (arquitetos e engenheiros civis) que possuem entre 05 e 34 anos de formados. Já o experimento 02, nomeado Modelação Geométrica e Generativa, foi aplicado com estudantes de cinco diferentes países (Polônia, Japão, Inglaterra, Marrocos e França), que cursavam, à época, o Mestrado Integrado em Arquitetura, da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa (UL), na cidade de Lisboa/Portugal.

Apesar de não terem a mesma natureza, os dois experimentos possuem similaridade em duas abordagens centrais: a *capacitação* na ferramenta de projeto paramétrico e as restrições dadas à *concepção* projetual. Entre restrições fornecidas estão: 1) o uso de preexistências; 2) a observância a uma lista de materiais construtivos; 3) a colaboração entre projetistas; e 4) a obrigatoriedade do emprego da complexidade formal pelo uso da modelagem/modelação paramétrica.

Os experimentos de projeto de mesma natureza serão analisados conforme as categorias de análise elaboradas para esta tese (já descritas no capítulo 3), quando também

serão verificadas a confirmação total, parcial ou a não confirmação da hipótese inicialmente lançada. Por fim, o último tópico deste capítulo trará um panorama geral de considerações tiradas a partir dos resultados de todos os experimentos.

3.1 Experimento 01: Oficina de Projeto Paramétrico (Natal/Brasil)

A partir da necessidade de realização de experimento de projeto com profissionais no âmbito desta tese, bem como da construção de uma cobertura de madeira de interligação entre dois edifícios do Centro de Tecnologia da UFRN, foi desenvolvida uma ação integrada de ensino e extensão, articulada a esta pesquisa de doutoramento. A ação de extensão, denominada Oficina de Projeto Paramétrico, foi agregada a uma disciplina/unidade curricular no âmbito do ensino de projeto no Mestrado Profissional do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Projeto e Meio Ambiente da UFRN, intitulada Oficina de Projeto Computacional. A ação de extensão foi coordenada pelo pesquisador, que é professor da graduação no Departamento de Arquitetura da UFRN, enquanto a disciplina de pós-graduação foi ofertada pelos professores Maísa Veloso e Heitor Andrade, sob a coordenação da primeira, orientadora desta tese no âmbito da UFRN.

Essa ação integrada de extensão e ensino abriu a oportunidade para a realização de outras, para além do propósito desta tese. Ofertas futuras podem abordar outras temáticas do projeto computacional, como o *Building Information Modeling* (BIM) e a Prototipagem Digital.

A primeira edição foi realizada no primeiro semestre de 2019, concentrada nos meses de abril a julho, contando com a participação de arquitetos com experiência na prática projetual em âmbito profissional, apesar de não terem tido experiência anterior com projeto paramétrico. Com o propósito de diversificar as equipes colaborativas de projeto para o experimento, além dos discentes regulares do mestrado profissional, foram abertas inscrições para discentes especiais que deveriam ser necessariamente arquitetos ou engenheiros civis. O atendimento ao objetivo principal desta tese reforçou a necessidade de integrar, à equipe de mestrandos profissionais inscritos regularmente, arquitetos da Secretaria de Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (SIN-UFRN) e

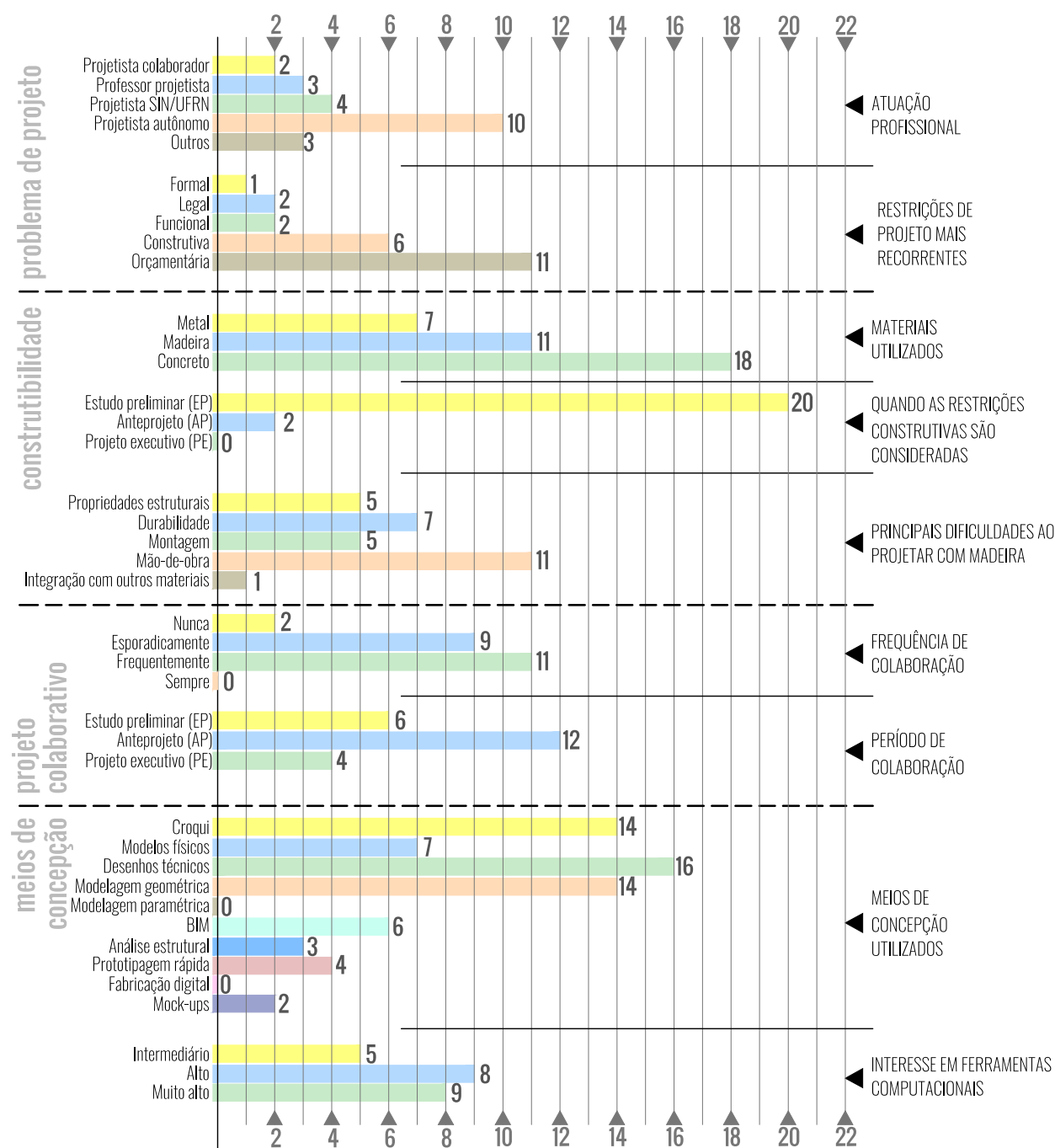
engenheiros civis calculistas, externos à UFRN. A inscrição desses últimos deu-se via ação de extensão.

3.1.1 *Perfil dos profissionais*

Para melhor compreender o perfil dos profissionais envolvidos na ação integrada, foi aplicado um formulário eletrônico para conhecer os seus modos de projetar. O formulário respondido pelos participantes foi estruturado incluindo aspectos como tempo de formação e as categorias de análise propostas para a tese (problema de projeto, construtibilidade, projeto colaborativo e meios de concepção), que serviram de parâmetros para a análise dos resultados.

A Oficina de Projeto Paramétrico foi dividida em três partes: *capacitação, concepção e materialização*. Após a primeira, solicitou-se aos participantes que respondessem a um questionário, que mais tarde veio a ser a base para equilibrar as futuras equipes colaborativas de projeto nas etapas de *concepção e materialização*. As questões feitas aos profissionais foram separadas em quatro blocos, precedidas de perguntas sobre o perfil profissional. Os blocos de perguntas, seguindo as principais áreas de interesse desta pesquisa, foram sobre: questões gerais de projeto; construtibilidade; projeto colaborativo; e modelagem paramétrica. Essas categorias, após a realização do Experimento 01, foram renomeadas, respectivamente, para Problema de projeto, Construtibilidade, Projeto colaborativo e Meios de Concepção.

A ação integrada contou com 22 participantes. Quanto ao seu **perfil profissional**, 15 eram arquitetos discentes do Mestrado Profissional (MP), inscritos na disciplina/unidade curricular, ao passo que os demais (quatro arquitetos e três engenheiros civis) tiveram como vínculo a ação de extensão, conforme gráfico da Figura 62.

Figura 62 – Perfil de atuação dos profissionais envolvidos no experimento 01.

Fonte: Elaborado no Google Forms a partir das respostas ao formulário eletrônico.

A maior parte dos profissionais envolvidos era de projetistas autônomos, com escritório próprio, ou projetistas em instituição pública (Superintendência de Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – SIN/UFRN). Dos três engenheiros civis, um era professor de estruturas com experiência em projeto e os outros dois atuavam como calculistas colaboradores em escritórios de engenharia estrutural.

O primeiro bloco de perguntas, sobre o **problema de projeto**, buscou levantar quais eram, na prática projetual cotidiana dos participantes, as principais restrições de projeto no momento de concepção. Os profissionais participantes consideram as restrições construtiva e orçamentária como as principais durante os seus processos de projeto.

O próximo bloco de perguntas abordou questões relativas à **construtibilidade** dos projetos desenvolvidos cotidianamente pelos participantes. As três primeiras foram para entender que tipo de material era mais frequentemente usado: se concreto, madeira ou metal. Grande parte dos profissionais já projetou edifícios em que o material construtivo predominante é o concreto, metade já utilizou a madeira e poucos deles utilizaram metal. Esse resultado reflete, de certo modo, a realidade do que se percebe nos edifícios da cidade de Natal, local de realização da Oficina de Projeto Paramétrico. Nela, é escasso o uso da madeira e aço na construção civil. Não se sabe ao certo se isso acontece devido à falta de interesse dos arquitetos quanto à sua utilização, ou se o mercado de construção não absorve tais sistemas.

O fato de a maioria dos profissionais projetar predominantemente com concreto pode indicar que é possível haver lacunas de conhecimento técnico no tocante a aspectos tipicamente característicos de construções que utilizam pré-fabricação, uma forte diretriz de projetos em madeira e metal.

Com base no que defende Piñón (1998, p.92), quando afirma que não há concepção projetual sem consciência construtiva, buscou-se entender em que momento da prática projetual cotidiana os profissionais inseriam o conhecimento do material construtivo e suas restrições.

Os momentos foram classificados conforme estabelece a Norma Brasileira de Representação de projetos de Arquitetura, a NBR 6492, de 1994, sem atualizações recentes, que divide as fases do projeto em estudo preliminar, anteprojeto e projeto executivo. Essa terminologia temporal foi definida por se tratar de fases com as quais projetistas brasileiros estão mais familiarizados. Praticamente dois terços dos respondentes (treze) afirmaram que o material já começa a ser considerado nas primeiras ideias, o que corrobora com o que defende Piñón (1998, p.92). Outros sete dizem que consideram as restrições construtivas

logo após as primeiras ideias, quando já são representados os desenhos esquemáticos do edifício.

Mesmo sabendo que a metade dos participantes nunca projetou levando em conta a madeira como material construtivo predominante, perguntou-se quais as principais dificuldades a ser enfrentadas durante o processo de projeto que utiliza esse material, já que seria usado para executar a obra da cobertura de interligação objeto da ação integrada. A maior parte dos projetistas respondeu que a principal dificuldade seria a mão-de-obra, seguida da durabilidade do material, das propriedades estruturais e dos aspectos de montagem.

Ainda no grupo de questões acerca da construtibilidade, perguntou-se aos participantes se, em algum momento de projetos anteriormente desenvolvidos, haviam sido explorados *mock-ups* como meio de concepção projetual. Apenas dois dos participantes utilizaram esse recurso, podendo apontar desconhecimento ou mesmo dificuldade em usar *mock-ups* devido a limites orçamentários comumente impostos na indústria da construção civil nacional brasileira.

O grupo seguinte de questões, que tratou de **projeto colaborativo**, buscou investigar como os projetistas integram a participação de outros profissionais em seus processos de projeto. A primeira pergunta feita buscou identificar a periodicidade de integração dos projetistas com equipes colaborativas no cotidiano. Metade dos profissionais costuma colaborar frequentemente com outros, enquanto a outra metade trabalha esporadicamente ou nunca trabalhou. Em análise individual das respostas, constatou-se que a totalidade dos projetistas vinculados à SIN-UFRN colabora frequentemente com outros profissionais.

Em relação ao momento da colaboração projetual, metade dos profissionais a faz nas fases iniciais e intermediárias do processo projetual, e a outra metade, no final do processo.

A última pergunta buscou saber como se dá o uso de recursos computacionais de projeto pelas equipes colaborativas na atividade projetual cotidiana dos projetistas. A maioria respondeu que **normalmente não trabalha colaborativamente em um arquivo comum** – o *master model*, citado por Klinger (2008, p.29) – **durante o processo de projeto**,

havendo apenas troca de arquivos, de cada especialidade, com representações bidimensionais (plantas, cortes, fachadas e detalhes). Alguns arquitetos afirmaram utilizar a plataforma BIM (*Building Information Modeling*), mas apenas para aceleração dos seus processos, sem realizar integração colaborativa com outros profissionais.

Todos os engenheiros civis respondentes afirmaram que utilizam aplicações como o TQS, que tem boa interface e exporta desenhos técnicos CAD, para comunicar-se com os arquitetos. Mas, quando o projeto ganha complexidade, eles afirmaram que passam a usar SAP2000, ABAQUS ou ANSYS, ferramentas que, segundo eles, não permitem qualquer tipo de integração entre as etapas de análise estrutural (feita pelo método dos elementos finitos), dimensionamento e detalhamento.

De um modo geral, essa separação do fluxo de trabalho dos arquivos digitais vai contra o que estabelece Klinger (2008, p.29), ao citar o *Master Model* como método efetivo de colaboração, sendo este um modelo computacional que deve concentrar as informações de todas as especialidades. De acordo com o autor, isso potencializa a colaboração entre profissionais da era digital em projetos de edifícios de forma complexa.

O último grupo de perguntas tratou de questões relacionadas ao uso das representações durante a concepção projetual, ou os **meios de concepção** do projeto, mais especificamente no que diz respeito ao perfil potencial que deve ter o projetista que usa modelagem/modelação paramétrica, segundo Woodbury (2010, pp.24-48). O autor descreve que projetistas com bom desempenho em projeto paramétrico são, em sua maioria, jovens, parte matemáticos, parte cientistas da computação. Acrescentaram-se, antes das questões principais, algumas gerais sobre os meios de concepção e representação de seus processos de projeto, devido ao caráter amplo da atividade de projetar.

A primeira pergunta buscou saber que tipos de recursos de concepção e representação do projeto eram mais utilizados no cotidiano dos projetistas. Todos os 22 participantes utilizam recursos computacionais, 14 deles projetam utilizando croquis, ao passo que menos de 1/3 deles utilizou protótipos (sejam eles modelos físicos ou protótipos rápidos) durante seus processos de projeto.

A questão seguinte tratou especificamente dos recursos computacionais utilizados cotidianamente pelos projetistas. Cerca de 2/3 dos profissionais utilizavam desenhos técnicos e modelagem/modelação geométrica, enquanto 1/3 deles usava o BIM como plataforma de projeto.

No tocante ao nível de interesse dos profissionais por ferramentas computacionais associadas a processos de projeto, 17 dos participantes declararam ter interesse alto ou muito alto, o que se refletiu, em fase posterior, em maior dedicação ao aprendizado da modelagem/modelação paramétrica.

A última pergunta indagou aos participantes se usualmente associam o conhecimento matemático ou de programação computacional durante os seus processos de projeto, cotidianamente. A metade afirmou que sim e a outra metade, que não. Essa prática de associação de regras matemáticas ou de programação pode indicar melhor apreensão e aplicação da modelagem/modelação paramétrica em projetos, já que a criação de regras é procedimento projetual básico do projeto paramétrico, como indica Oxman e Gu (2015, p.478).

As respostas ao questionário que antecedeu a realização da etapa de *concepção*, juntamente com a percepção do pesquisador e dos professores da disciplina, contribuíram para a definição das equipes de projeto colaborativas, assunto a ser tratado ainda neste capítulo.

3.1.2 Metodologia da Oficina

A Oficina de Projeto Paramétrico teve o propósito da aplicação de ferramentas computacionais associada a processos de projeto, ou seja, visou não apenas capacitar profissionais para o uso de ferramentas de auxílio ao desenho em computador como também e, sobretudo, sua aplicação na concepção e desenvolvimento de projetos. No caso do Projeto Paramétrico, objeto da primeira edição da Oficina, foram trabalhados

Os fundamentos teórico-práticos do projeto arquitetônico computacional, utilizando meios de representação tradicionais e computacionais, mas tendo a modelagem paramétrica algorítmica, mediada pelo uso da aplicação *Grasshopper*, como principal meio de criação. Conceitos e técnicas básicas de modelagem do

projeto paramétrico trabalhados por meio da interface de programa computacional de programação visual voltada à criação de formas geométricas com foco na construtibilidade desde as etapas iniciais da concepção. Estudo das restrições construtivas do material a ser aplicado na execução do objeto arquitetônico. Materialização de um dos objetos arquitetônicos concebidos (em modelo de escala reduzida e, possivelmente, em escala 1:1) com a contribuição dos participantes (PLANO DE CURSO, OFICINA DE PROJETO COMPUTACIONAL, PPAPMA/UFRN, 2019.1).

Ainda segundo o Plano de Curso, os objetivos dessa edição foram “aperfeiçoar conhecimentos relativos à abordagem paramétrica no projeto, visando a construtibilidade do objeto arquitetônico”; aprofundar “conceitos e teorias do processo de projeto; conhecer aplicações do projeto paramétrico na arquitetura; utilizar ferramenta de programação visual *Grasshopper* direcionada à reprodução e concepção de objetos arquitetônicos”; e, por fim, “projetar parametricamente pequenos objetos arquitetônicos, inserindo as restrições construtivas envolvidas na execução do projeto”.

Para tanto, foram inicialmente trabalhados fundamentos teóricos relacionados ao processo de projeto, em especial ao projeto paramétrico, por meio de aulas expositivas e leituras sobre o tema. Em seguida, foi feito o treinamento dos participantes para a aplicação do *Grasshopper*; realizados estudos de referências projetuais de edifícios de formas complexas que aplicaram a modelagem paramétrica no processo de projeto, para que, em seguida, a partir da análise dos resultados formais, fosse possível modelar parametricamente partes do objeto arquitetônico. Por fim, houve o ateliê de concepção de projeto aplicando os conhecimentos adquiridos em situações específicas.

Metodologicamente, a Oficina foi estruturada em oito encontros de três horas-aula, realizados principalmente no Laboratório de Informática da Arquitetura e, em uma ocasião, no Auditório da Superintendência de Infraestrutura (Figura 63a e b), destinados, em um primeiro momento, à *capacitação* nas ferramentas por meio de exercícios de reprodução de formas complexas; em um segundo módulo, à *concepção* de um elemento arquitetônico; e, no terceiro, à *materialização* das propostas, das quais uma viria a ser executada no campus da UFRN.

Os quatro encontros seguintes à *capacitação* foram destinados à etapa de *concepção*. O primeiro desses encontros foi iniciado com a divisão das equipes de projeto, que será mais bem detalhada no tópico 3.1.4. Ainda nesse encontro, além da distribuição das equipes, foi apresentado o enunciado do exercício projetual, ocasião em que se divulgou que as propostas concorreriam entre si, na modalidade concurso de ideias, para que a escolhida pudesse ser executada pelo Centro de Tecnologia. Ao final, foi reservado horário para que as equipes realizassem estudos de referências projetuais que embasassem as atividades do encontro seguinte.

Figura 63: a) Laboratório de Informática/DARQ/UFRN e b) Auditório da SIN/UFRN.



Fonte: Acervo do autor.

O produto arquitetônico a ser projetado se tratava de uma passarela com cobertura em madeira de forma complexa, que conectaria o bloco dos laboratórios em Arquitetura ao novo prédio da Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPGAU, situado no Centro de Tecnologia (Figura 64).

Figura 64 – Planta de implantação e volumetria da área disponível para o projeto.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019, a partir de bases digitais da SIN-UFRN.

Para a concepção do projeto, deveriam ser consideradas as seguintes **restrições**:

Quanto às preexistências e aos projetos em execução

- Edifícios existentes a conectar (implantação, forma, estética, materiais e sistemas construtivos dos dois prédios); previsão de expansão do edifício novo; topografia existente; sistema de drenagem / grelhas; agenciamento do piso; árvore existente - angico (a preservar); paisagismo proposto - espécies para recobrimento da estrutura;

Quanto ao elemento arquitetônico a ser projetado

- Localização e solução das fundações; características dos materiais fornecidos (Apêndice B); o material a ser aplicado no projeto deve ser a madeira do tipo maçaranduba, peças a escolher conforme sistema proposto e propriedades estruturais a ele pertinentes (flexão, compressão e tração); recobrimento da estrutura em telha mais vegetação do tipo trepadeira; a depender da tipologia de cobertura adotada, os tipos de nós utilizados nas conexões estruturais, visando minimizar custos e facilitar o modo de fabricação; montagem e tempo de execução; para a obra, todos os cortes das peças serão feitos na marcenaria da UFRN ou outro meio, sem possibilidade de aplicação de fabricação digital.

No item 2, a lista das características dos materiais a serem considerados pelas equipes foi obtida junto ao armazém de materiais de construção da UFRN (nomeado almoxarifado), disponível no sistema SIPAC, exigência do Centro de Tecnologia para que fosse minimizada a aquisição de materiais e serviços de origem externa à época da obra, dada a contenção de orçamento que a instituição atravessava.

No que diz respeito à utilização do ambiente e tempo das reuniões, ficou estabelecido que os projetos deveriam ocorrer no âmbito de ateliê integrado entre os projetistas, fossem eles nos horários e local destinados à oficina (Laboratório de Informática do Departamento de Arquitetura da UFRN) ou não.

Outra condição posta foi que um dos meios de concepção e representação fosse a modelagem/modelação paramétrica (utilizando os *softwares Rhinoceros, Grasshopper e Karamba3D* para o cálculo estrutural) e que a forma do objeto arquitetônico tivesse possibilidades de variação geométrica definidas por parâmetros. Outros recursos poderiam ser utilizados livremente para guiar os projetistas, como croquis, modelos físicos de estudo, esquemas, entre outros.

Além do desenvolvimento do projeto, cada equipe deveria apresentar um memorial justificativo das soluções empregadas, tendo em vista as restrições dadas, em um texto de, no máximo, duas páginas.

Na semana seguinte, foi reservado um encontro para a definição do conceito e partido do projeto, assim como para a criação das regras paramétricas aplicadas na futura modelagem/modelação a se desenvolver.

O terceiro encontro, considerando a evolução das propostas e o fato de serem projetos que estavam competindo entre si, foi reservado para que os professores tirassem dúvidas relativas ao que estava posto no enunciado, de modo a ajudarem esclarecendo dúvidas relativas à incorporação das ideias projetuais na modelagem/modelação paramétrica.

O quarto e último encontro da etapa de concepção foi destinado à apresentação das propostas para a comissão julgadora do concurso, composta pelos professores⁶ envolvidos na ação integrada, tendo os grupos mais quatro dias para refinar as propostas antes do seu envio por e-mail, para que houvesse uma análise minuciosa por parte da comissão julgadora.

Por último, houve o encontro de *materialização*, com seis horas-aula, para a execução final das maquetes das propostas dos participantes da Oficina. Nesta ocasião, boa parte dos participantes se integrou e contribuiu para a montagem do protótipo do projeto vencedor do concurso de ideias.

3.1.3 Capacitação dos participantes

Os quatro encontros iniciais da oficina foram reservados para a capacitação na ferramenta. No primeiro, foi realizada a abordagem teórica acerca de processos de projeto geral e paramétrico (baseado em regras), sinalizando para as especificidades deste último,

⁶ Incluindo os professores doutores Felipe Tavares (Engenheiro Civil), Rubenilson Teixeira (arquiteto coautor do projeto do PPGAU, juntamente com a professora Maísa Veloso) e Luiz Alessandro Queiroz (arquiteto e Diretor do Centro de Tecnologia da UFRN).

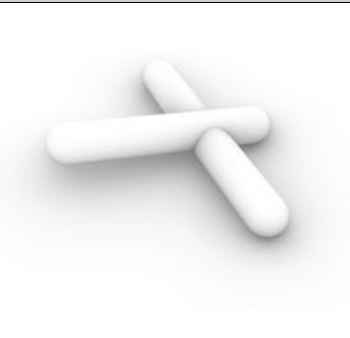
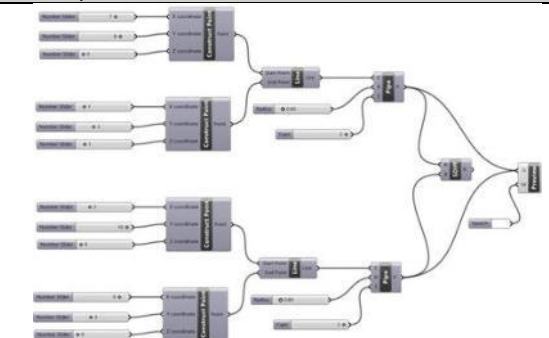
seguida da apresentação da lógica da programação visual computacional, utilizando a interface dos programas *Rhinoceros* e *Grasshopper* por meio de um exercício simples.

Devido ao curto tempo de execução da Oficina como um todo, especialmente a etapa de capacitação, optou-se por dar noções introdutórias de modelagem geométrica no *Rhinoceros*, traçando um paralelo com outros *softwares* CAD, como o *Sketchup* e o *Autocad*, para que restasse mais tempo para a imersão na modelagem/modelação paramétrica, com o programa *Grasshopper*.

No primeiro exercício executado na etapa de *capacitação*, realizado no primeiro dia da Oficina, partiu-se preliminarmente da construção de quatro pontos, sendo cada um deles controlado por coordenadas XYZ distintas. Em seguida, os pontos construídos foram ligados dois a dois, de modo a construir dois segmentos de reta no espaço. Esses segmentos, posteriormente, transformaram-se no eixo longitudinal de volumes tubulares, em que as extremidades eram semiesferas (Figura 65).

Essa composição permitiu aos participantes, através do controle das coordenadas dos pontos, perceber como a manipulação dos parâmetros pode afetar a geometria final do objeto, entendendo o princípio estabelecido por Woodbury (2010, p.24), em que as alterações locais têm interferência no todo ou no global.

Figura 65 – Resultado do exercício de reprodução de barras que se interceptam.

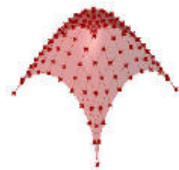
DESCRIÇÃO	GEOMETRIA OBTIDA (à esquerda) e CÓDIGO (à direita)	
Exercício 01 Construção de barras que se interceptam. MODO DE EXECUÇÃO: presencial		

Fonte: autoria própria, 2019.

O segundo encontro contou com a realização de mais cinco exercícios (Figura 68), onde foram explorados desde princípios básicos da construção de geometria euclidiana, até composições geométricas complexas. O princípio foi dar, nessa fase de *capacitação*, um repertório mínimo para que os participantes pudessem conhecer noções básicas do uso da

lógica algorítmica, sem o compromisso de gerar qualquer tipo de relação com futuras propostas de projeto para a fase de *concepção*.

Figura 66 – Exercícios de reprodução realizados no dia 02 da etapa de capacitação.

DESCRIÇÃO	GEOMETRIA OBTIDA
Exercício 01 Construção de um bolo por subdivisão de círculos e interpolação de arcos MODO DE EXECUÇÃO: presencial	
Exercício 02 Subdivisão de uma superfície em duas direções MODO DE EXECUÇÃO: presencial	
Exercício 03 Fatiamento de um sólido para criação de efeito <i>waffle</i> MODO DE EXECUÇÃO: presencial	
Exercício 04 Escalonamento de perfurações a partir da atração a um ponto MODO DE EXECUÇÃO: Consulta a videoaula	
Exercício 05 Teste de forças de gravidade em uma estrutura, utilizando o <i>plug-in Kangaroo</i> MODO DE EXECUÇÃO: Consulta a videoaula	

Fonte: autoria própria, 2019.

O terceiro encontro contou com a participação do Professor Doutor Felipe Tavares⁷, engenheiro civil, pesquisador experiente na área de cálculo estrutural de estruturas paramétricas, que apresentou a interface e possibilidades de uso do *Add-on Karamba3D*, um módulo de simulação estrutural completamente integrado a modelos paramétricos criados no *Rhinoceros* e *Grasshopper*.

Na ocasião, foi trazido um modelo estrutural simplificado com sistema de pilares, vigas e terças, onde foram exploradas as funcionalidades e vantagens do uso do programa por engenheiros civis especialistas em cálculo estrutural.

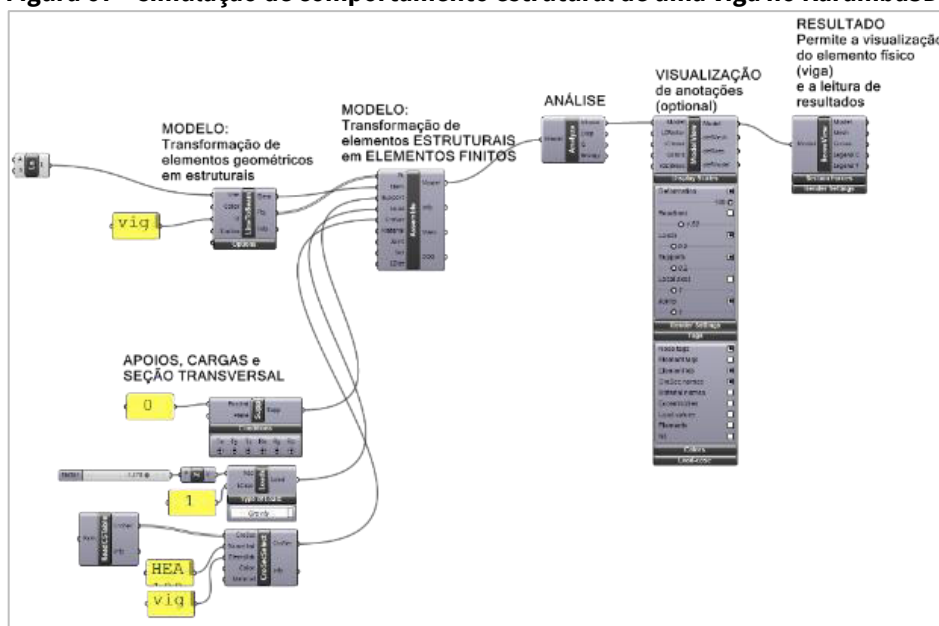
Entre outras diretrizes de utilização, foi recomendado aos participantes que o uso apropriado do *Karamba3D* estava intimamente ligado à maneira de se gerenciar,

⁷ À época do experimento 01, professor da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia (UFBA). Graduado em Engenharia Civil pela UFPB (2004), mestre em engenharia estrutural pela UFPE (2006) e doutorado em Engenharia Mecânica (vibrações estruturais) na UFPB (2011).

corretamente, os dados gerados pelos modelos paramétricos arquitetônicos. Isso se traduz em pensar o projeto arquitetônico juntamente com a estrutura. Como diretriz geral, foi recomendado que seria de extrema importância separar as categorias estruturais do modelo paramétrico, de acordo com a função estrutural de cada categoria de elementos. Isso foi traduzido, no exemplo trazido pelo professor, na segmentação dos fluxos de dados de pilares, vigas e terças, a partir dos quais foram geradas as simulações de comportamento estrutural. Na Figura 67 foi simulado o comportamento estrutural de uma viga, originada a partir de uma linha do *Grasshopper*. Nesse sentido, uma linha transforma-se em modelo geométrico em estrutural, que se transforma em elementos finitos, os quais são analisados, visualizados e se obtêm os resultados.

Outra diretriz de projeto importante que foi passada no mesmo dia foi a padronização das conexões estruturais, pois seria um quesito que viria a afetar diretamente os custos e o modo de fabricação desses elementos.

A aceitação do *Karamba3D* foi relativamente intimidadora para os arquitetos participantes da oficina, uma vez que não possuíam conhecimento em determinados aspectos técnicos da engenharia estrutural, necessário para a compreensão da lógica de sequenciamento do exercício desenvolvido pelo professor. Os engenheiros civis tiveram mais familiaridade com os termos adotados durante a explanação do professor, o que confluuiu para terem mais interesse na aplicação.

Figura 67 – simulação de comportamento estrutural de uma viga no Karamba3D.

Fonte: adaptado de TAVARES, 2019.

O quarto e último encontro da capacitação foi reservado para a compreensão e aplicação de gerenciamento de listas de dados, especialmente o manuseio de estruturas de dados em formato de árvore, por meio de exercício que reproduziu um parabolóide hiperbólico (Figura 68). Para esse exercício, foi dado apenas um enunciado, pois a construção do algoritmo ficaria a cargo dos participantes. Forneceram-se, textualmente, apenas os parâmetros geométricos que deveriam ser controlados através dos exercícios de reprodução 01 e 02, que foram sequenciais, conforme a seguir:

EXERCÍCIO DE REPRODUÇÃO 01/DIA 04 - Execute um pórtico, apenas com o uso de linhas, obedecendo aos seguintes parâmetros:

Pilar 1 (vertical): altura variando de 1,0 e 2,5m;

Pilar 2 (vertical): altura variando de 2,5 e 3,5m;

Vão entre pilares (no eixo X): 2,5 a 3,5m;

Viga conectando os topos dos pilares 1 e 2.

EXERCÍCIO DE REPRODUÇÃO 02/DIA 04 - Execute um parabolóide hiperbólico*, apenas com o uso de linhas, a partir do pórtico criado no exercício anterior, obedecendo aos seguintes parâmetros:

Vão entre pilares: variando de 2,0 e 3,5m;

Quantidade de peças (terças): variando entre 10 e 50.

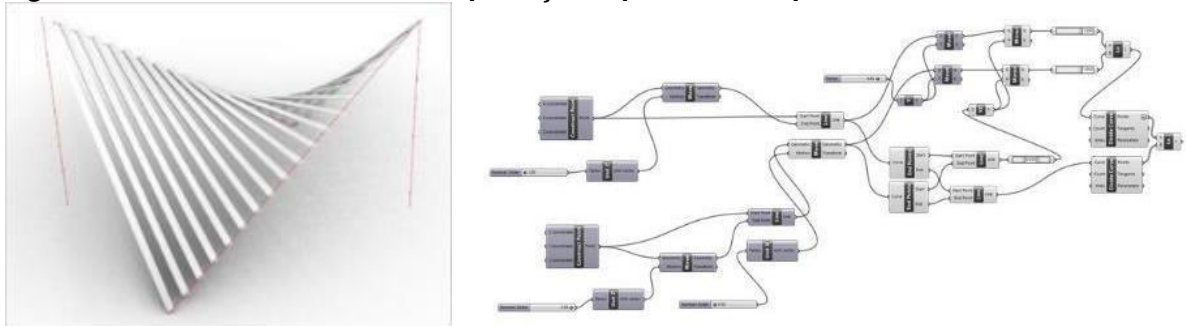
*O Paraboloide hiperbólico pode ser criado por meio da conexão entre dois segmentos de reta (que podem ser vigas), de inclinações opostas por uma linha de espelhamento, onde a divisão dos segmentos destas vigas, quando conectados através de outros segmentos de reta (terças), cria uma superfície de dupla curvatura.

(Exercícios de Reprodução 01 e 02/Dia 04, Oficina de Projeto Computacional, PPAPMA/UFRN, 2019.1).

O exercício foi desenvolvido individualmente e a maior parte dos participantes conseguiu, de modo independente, fazer a tarefa no próprio laboratório, poucas horas após iniciarem.

Foi apenas no exercício do paraboloide hiperbólico que os participantes declararam ter mais independência para passar à fase posterior de *concepção*. Observou-se ainda que a independência na criação das regras algorítmicas lançadas pelo último exercício foi o método que mais contribuiu com a associação do pensamento algoritmo, onde as abstrações das regras são convertidas em produtos geométricos.

Figura 68 – Resultado do exercício de reprodução do paraboloide hiperbólico.



Fonte: autoria própria, 2019.

Ao término da capacitação dos profissionais, foi possível gerar, por observação direta do pesquisador, uma classificação de habilidades das competências adquiridas por cada participante no uso da ferramenta, sendo utilizada como um dos critérios para a formação das equipes colaborativas da etapa seguinte.

3.1.4 Formação e perfil das equipes colaborativas

Após a etapa de *capacitação*, os 19 arquitetos e 3 engenheiros civis participantes foram classificados e distribuídos entre os grupos de 01 a 06 (Quadro 7). Os critérios para o agrupamento das equipes colaborativas consideraram: i) a formação acadêmica – se arquiteto ou engenheiro civil; ii) o vínculo acadêmico/profissional (MP, SIN/UFRN, PPGAU ou EXT)⁸; iii) tempo de graduação em arquitetura ou engenharia civil; e iv) as habilidades com modelagem/modelação paramétrica (verificadas durante a etapa de *capacitação*). A partir desses critérios, os profissionais foram distribuídos equilibradamente entre os grupos.

Quadro 7 - Agrupamento das equipes colaborativas do experimento 01.

Grupos	Categoria colaborativa	Identificação do profissional
G1-P	CP1 Apenas arquitetos	G1-P-ARQ1
		G1-P-ARQ2*
		G1-P-ARQ3
G2-P	CP1 Apenas arquitetos	G2-P-ARQ1
		G2-P-ARQ2
		G2-P-ARQ3
G3-P	CP1 Apenas arquitetos	G3-P-ARQ1
		G3-P-ARQ2
		G3-P-ARQ3
		G3-P-ARQ4
G4-P	CP2 Arquitetos e eng. civil	G4-P-ARQ1
		G4-P-ARQ2
		G4-P-ARQ3
		G4-P-ENG1
G5-P	CP2 Arquitetos e eng. civil	G5-P-ARQ1
		G5-P-ARQ2
		G5-P-ARQ3
		G5-P-ENG1
G6-P	CP2 Arquitetos e eng. civil	G6-P-ARQ1
		G6-P-ARQ2
		G6-P-ARQ3
		G6-P-ENG1

Compuseram os grupos 01 ao 03 apenas arquitetos (três nos grupos 01 e 02 e quatro no G3-P), enquanto os grupos 04 ao 06 tinham três arquitetos e um engenheiro civil. Os grupos que possuíam apenas arquitetos foram classificados como colaborativo 1 (CP1),

⁸ MP (estudantes do Mestrado Profissional), SIN/UFRN (projetistas da Secretaria de Infraestrutura da UFRN), PPGAU (projetistas que estão cursando Mestrado ou Doutorado no Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo) ou EXT (vinculados à ação de extensão).

enquanto os que possuíam arquitetos(as) e engenheiro(a) civil foram classificados como colaborativo 2 (CP2).

Definidas as equipes de projeto, partiu-se para a fase seguinte, em que os profissionais, colaborativamente, desenvolveram os projetos a partir do enunciado lançado, conforme descrito na “Metodologia da Oficina”.

3.1.5 Os processos de projeto das equipes colaborativas

Os seis grupos iniciaram o desenvolvimento das suas propostas definindo, conforme estabelecido no primeiro encontro da etapa de *concepção*, como seria a dinâmica de relacionamento entre os projetistas durante as reuniões, visto que a maior parte dos participantes de cada grupo não se conhecia até participar da Oficina, ou nunca tinha projetado colaborativamente com o grupo que se organizou.

O acompanhamento dos processos de projeto deu-se por: 1) observação direta do pesquisador; 2) coleta de representações produzidas pelos projetistas; e 3) dinâmica de grupo focal, realizada poucos dias após a entrega dos projetos. Nessa dinâmica, foram feitas perguntas estruturantes (Apêndice C) e a partir das representações gráficas e escritas produzidas pelas equipes as discussões foram conduzidas.

Dos quatro encontros destinados à etapa de *concepção*, apenas os dois primeiros tiveram direcionamento por parte dos professores da disciplina. Ficou acertado que todos os grupos iriam realizar, como metas obrigatórias:

- Planejamento e gestão do tempo;
- Definição do tipo de modalidade de projeto colaborativo (concurso de ideias interno ou co-concepção);
- Estudos de referências/precedentes projetuais;
- Partido arquitetônico;
- Planejamento geral da modelagem paramétrica.

O formato para a realização das metas não foi imposto. Os encontros restantes, até a etapa de *materialização*, foram utilizados livremente pelos projetistas, com as estratégias que julgaram mais adequadas aos seus processos de projeto.

No que diz respeito à descrição dos processos de projeto de cada grupo, foram observados e relatados os seguintes tópicos:

- Composição da equipe de profissionais;
- Planejamento de atividades;
- Definição da modalidade de concepção de projeto, quando assim houve;
- Estudos de referências projetuais;
- Definição de Conceito e Partido;
- Primeiras ideias e sua evolução;
- Planejamento da modelagem/modelação paramétrica;
- Conclusões acerca das categorias de análise;
- Apresentação do produto.

3.1.5.1 Grupo G1-P

Composto por três arquitetos, dois com cerca de 15 anos de formação (G1-P-ARQ1 e G1-P-ARQ3) e um com seis (G1-P-ARQ2), a equipe teve o desfalque do quarto membro, que abandonou a Oficina nos primeiros encontros realizados.

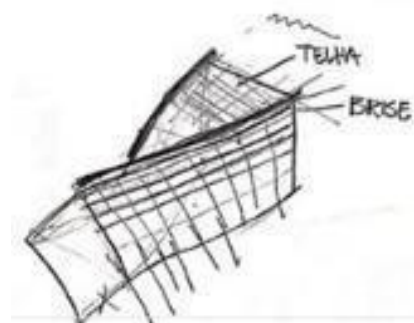
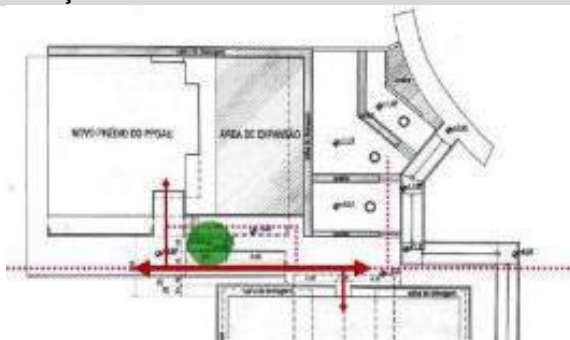
Eles dividiram as atividades por semanas. A primeira ficou destinada à revisão do enunciado de projeto e o desenvolvimento individual de propostas, para que pudesse ser adotada a modalidade de concurso de ideias interno. Nessa mesma semana, as propostas foram socializadas através dos meios de comunicação escolhidos. A segunda semana foi destinada à escolha de uma das propostas dos participantes e da definição do planejamento da execução do algoritmo. A terceira semana ficou reservada para a execução do projeto, ao passo que a última, para finalização.

O grupo pesquisou duas referências projetuais, que mais adiante tiveram reatamento no partido arquitetônico adotado. O partido arquitetônico do grupo levou em consideração duas premissas. A primeira delas seria priorizar as diversas ligações entre os acessos da área onde o projeto seria implantado, desde o acesso aos edifícios até aos passeios que os interligavam e a outros caminhos na Universidade. Foi possível identificar a presença de restrições formais e práticas, estas últimas de ordem construtiva.

Figura 69 – Primeiras ideias do G1-P.

Ação projetual: • Análise de restrições
Restrições: • Funcional

Ação projetual: • Estudo volumétrico
Restrições: • Formal e prática



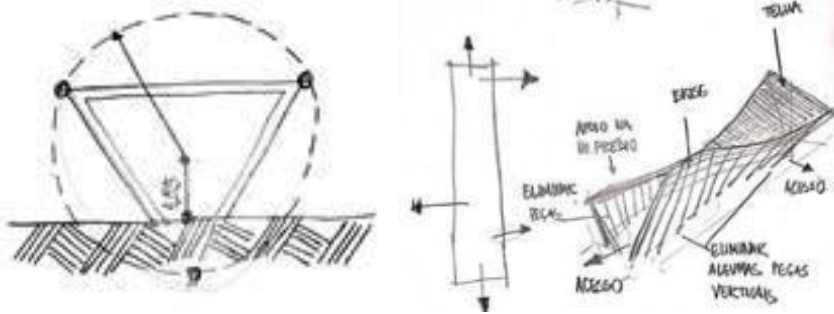
Fonte: G1-P da Oficina de Projeto Computacional.

Os projetistas levaram, então, as regras imaginadas no partido inicial para o algoritmo no *plug-in Grasshopper*. Isso permitiu-lhes perceber a geração grandes quantidades de encaixes, pois o pentágono tinha mais vértices do que outras figuras geométricas básicas que também poderiam se enquadrar na solução inicialmente pensada.

Segundo os projetistas, “...as formas do quadrado e pentágono foram logo substituídas, buscando a facilidade de execução do serviço e redução de custos”. Nesse instante, a equipe passa a considerar aspectos de custo e execução de modo mais enfático, o que passa a guiar o seu processo de projeto (Figura 70).

Figura 70 – Primeira mudança na forma do projeto do G1-P.

Ação projetual: • ESTUDO VOLUMÉTRICO e ANÁLISE DE VIABILIDADE CONSTRUTIVA
Restrições: • PRÁTICA (de ordem construtiva e orçamentária)



Fonte: G1-P da Oficina de Projeto Computacional.

Figura 71 – aplicação da primeira mudança na forma do projeto do G1-P no Grasshopper.

Ação projetual: • MODELAGEM PARAMÉTRICA – Criação de regras
Restrições: • PRÁTICA (de ordem construtiva e orçamentária)



Fonte: G1-P da Oficina de Projeto Computacional.

A questão do **problema de projeto** teve um peso igual entre os três profissionais. Ambos tiveram contribuições semelhantes nas primeiras ideias. À medida que a forma foi ganhando uma maior definição, a experiência dos arquitetos G1-P-ARQ1 e G1-P-ARQ2 com técnicas construtivas ajudou no entendimento da etapa de avaliação. Isto aconteceu quando estes tiveram de retornar às fases de análise e síntese, de modo não cíclico, conforme prevê Lawson (2011, p.47).

A **construtibilidade** interferiu no processo de projeto do grupo quando foi detectado que havia um maior consumo de material e maior gasto de tempo com a mão-de-obra, visto que os encaixes de pentágonos gerariam mais conexões do que se fosse considerado um triângulo. A preocupação com a racionalização da geometria proposta e

sua construtibilidade retornou quando da detecção de problemas com a inclinação da cobertura e dos elementos de madeira que interligariam os pórticos. Mesmo com toda a previsão orçamentária de consumo de material e a quantificação e orçamentação de materiais, um aspecto importante não foi planejado pelo grupo: as ligações estruturais.

Do ponto de vista do quesito **projeto colaborativo**, a equipe teve três perfis muito bem definidos. A liderança vertical apresentou-se como temporária (MÜLLER *et al.*, 2018, p. 85) e variou entre os profissionais G1-P-ARQ1 e G1-P-ARQ2, nas fases iniciais, tendo sido centralizada no G1-P-ARQ1 no final do processo. Duas questões podem explicar tal centralização. A primeira, devido ao fato de o G1-P-ARQ1 ter maior domínio das ferramentas computacionais, e a segunda, por seu interesse na ferramenta. O processo de projeto teve mais momentos de cooperação do que de colaboração.

No quesito **meios de concepção**, entre as ferramentas de concepção utilizadas, estiveram o croqui, o modelo paramétrico no *Grasshopper* (Apêndice I) e o modelo de quantificação e orçamentação em plataforma BIM, no programa *Autodesk Revit*. A equipe optou por não utilizar o *Karamba3D*, mas não declarou o motivo. Depreende-se que um possível fator possa ter sido a dificuldade de sua apreensão, já que exige a aplicação de termos da engenharia estrutural, e pelo gerenciamento de tempo, visto que foi um dos grupos que menos teve disponibilidade para participação no experimento de projeto.

A proposta projetual final do grupo foi criar uma passagem semipermeável, do ponto de vista dos acessos, gerada a partir de um pórtico triangular equilátero que sofria rotações sucessivas ao longo do eixo longitudinal da forma.

Figura 72 – Manipulação do projeto na plataforma BIM.



Fonte: G1-P da Oficina de Projeto Computacional.

Figura 73 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G1-P.



Fonte: G1-P da Oficina de Projeto Computacional.

O resumo das ações adotadas no processo de projeto do grupo, ao longo do tempo, pode ser consultado no Apêndice D.

3.1.5.2 Grupo G2-P

Assim como o G1-P, este grupo foi composto por três arquitetos, porém com média de tempo de formação menor. O profissional G2-P-ARQ1 tinha 10 anos de formado, enquanto os outros dois, três e quatro anos, respectivamente. O G2-P também teve o desfalque do quarto membro, que abandonou a Oficina nos primeiros encontros realizados.

O grupo planejou as suas atividades definindo quais seriam os meios de comunicação, a metodologia de projeto colaborativo, o cronograma e os meios de concepção e representação utilizados. Ficou definido, na ocasião do primeiro encontro, que os meios de comunicação seriam, além do presencial, as redes sociais, e que o local das reuniões seriam os laboratórios da própria UFRN. O desenvolvimento da proposta, segundo o grupo, seria baseado em meios computacionais como o *Rhinoceros* e *Grasshopper*, além de outros auxiliares.

Assim, dividiram as atividades em cinco momentos distintos. Em ordem, distribuíram-nas em: 1) visita ao local; 2) concurso interno de ideias; 3) *brainstorming*; 4) maquetes; 5) desenvolvimento no *software*.

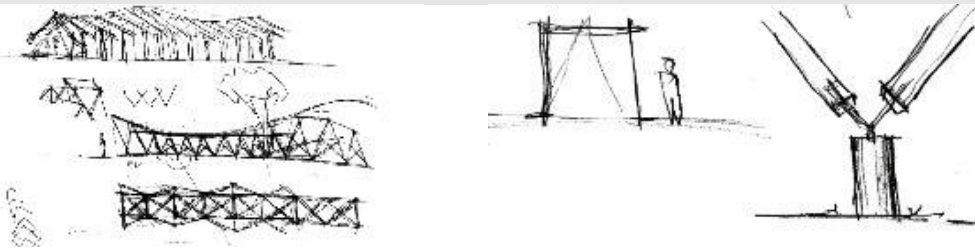
Na semana seguinte, as ideias iniciais da proposta surgiram. Através de estudos volumétricos (Figura 74) o grupo optou por definir alturas e encaixes estruturais. Depois de idealizarem a primeira proposta, o grupo passou a considerar as listas de materiais

fornecidas. Segundo eles, a partir daí, “seria muito importante se pensar na exequibilidade e limitação de materiais”.

A ideia inicial evolui para a otimização de material e de processos construtivos, conforme declarado pelos projetistas. Redefiniram a volumetria e pensaram em soluções para os encaixes dos vértices (Figura 75). A partir desta fase, o grupo iniciou a modelagem/modelação paramétrica (Apêndice I), mas estagnou devido a dificuldades de assimilação da ferramenta *Grasshopper*. Foi quando decidiram utilizar uma ferramenta não paramétrica para tentar digitalizar a ideia.

Figura 74 – Primeiras ideias do G2-P.

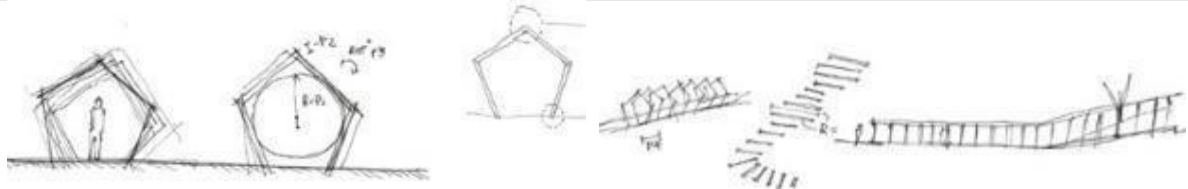
Ação projetual:	• ESTUDO e VOLUMÉTRICO	Ação projetual:	• ANÁLISE DE VIABILIDADE CONSTRUTIVA
Restrições:	• FORMAL;	Restrições:	• FUNCIONAL; PRÁTICA (construtiva);



Fonte: G2-P da Oficina de Projeto Computacional.

Figura 75 – Primeira mudança na forma do projeto do G2-P.

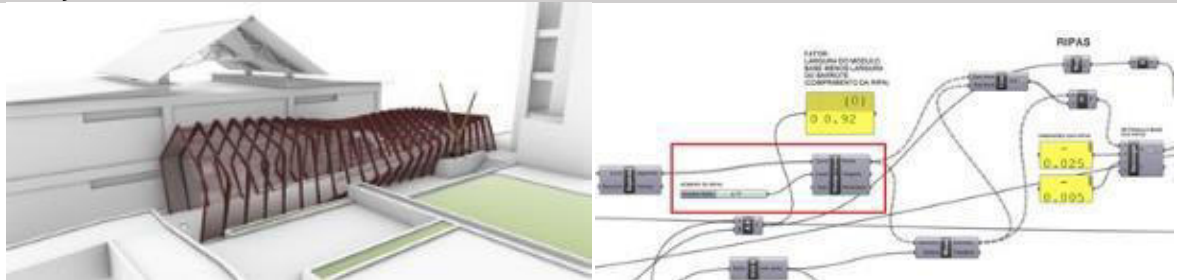
Ação projetual:	• ESTUDO VOLUMÉTRICO e ANÁLISE DE VIABILIDADE CONSTRUTIVA
Restrições:	• PRÁTICA (de ordem construtiva)



Fonte: G2-P da Oficina de Projeto Computacional.

Figura 76 – Teste de volumetria no modelo paramétrico pelo G2-P.

Ação projetual:	• MODELAGEM PARAMÉTRICA – Criação do código
Restrições:	• FORMAL



Fonte: G2-P da Oficina de Projeto Computacional.

O grupo investiu muito tempo tentando encontrar os ângulos de rotação do pórtico pentagonal desejáveis para o projeto, além do espaçamento entre as peças mais finas (ripas) que ligariam os vãos entre os pórticos. Neste instante, perceberam que a modelagem/modelação paramétrica seria útil (Figura 76).

Depois de chegarem à definição de espaçamento entre as ripas e de rotação dos pentágonos que deram origem ao projeto, os profissionais partiram para a etapa de otimização e racionalização da forma. Além de definirem as rotações dos módulos, realizaram também estudo de espaçamento entre os módulos desejados, quando chegaram à decisão de que um deveria ter 1,00 metro, e o outro 2,00 metros, para que pudessem otimizar o consumo de material. Essas duas medidas foram estabelecidas usando critério de análise da forma e de sua construtibilidade, uma vez que as duas medidas seriam submúltiplas da peça original da ripa, evitando, assim, perdas de material. Paralelamente, o grupo pensou também como seriam os encaixes dos pórticos nos vértices dos pentágonos que geraram os módulos de repetição rotacionados.

O G2-P foi um dos que decidiram fazer o estudo de materialidade. Eles tomaram a iniciativa de materializar os três módulos básicos do projeto, para testar a relação entre eles (Figura 77). Devido à escala, não foi possível validar os encaixes estruturais, apenas sentir a proporção do projeto materializada.

Figura 77 – Estudo de materialização feito pelo G2-P.



Fonte: G2-P da Oficina de Projeto Computacional.

O processo de projeto do G2-P teve, no quesito **problema de projeto**, um peso igual entre os três profissionais. Todos contribuíram para a resolução dos problemas de projeto durante todo o processo de projeto, buscando soluções que embasavam as decisões tomadas.

No tocante à **construtibilidade** da forma, não se sabe se o grupo buscava a otimização de executar o projeto inteiro com apenas três módulos, não fosse pela potencialidade de execução do projeto. Entende-se que a possibilidade de construção do projeto os motivou a tal, conforme captado em observação do pesquisador em um dos encontros da equipe. As questões de construtibilidade do objeto arquitetônico foram sendo resolvidas ao longo do processo, e percebe-se que, desde as primeiras ideias, a execução do objeto arquitetônico foi levada em consideração pela equipe.

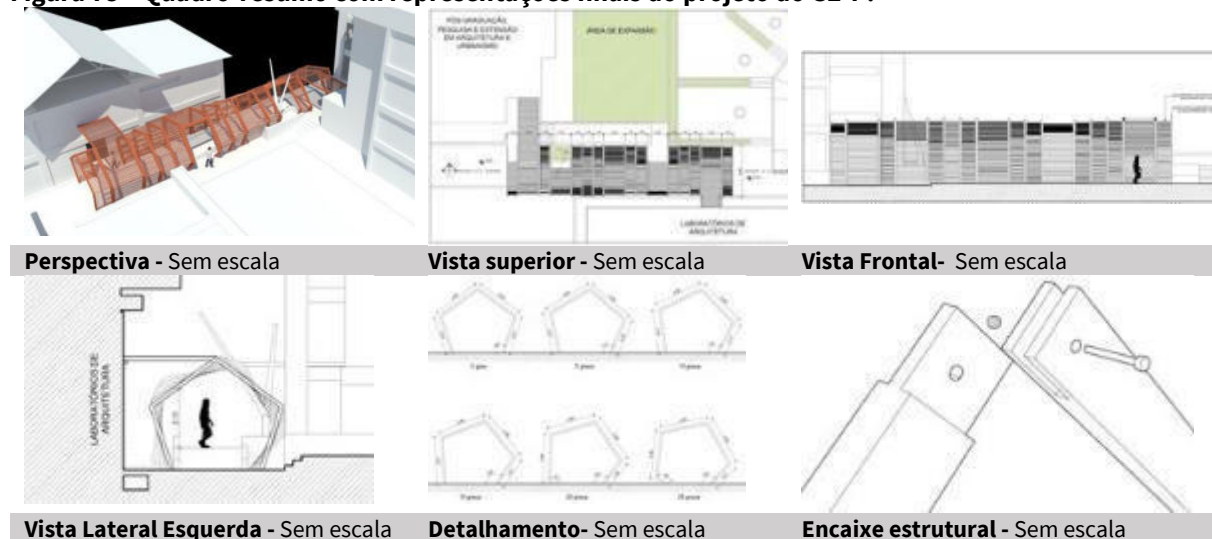
Do ponto de vista do quesito **projeto colaborativo**, a equipe teve três perfis muito bem definidos. A liderança do grupo variou entre os três profissionais desde as fases iniciais, mostrando uma constante presença de lideranças horizontais, como conceituado por Müller *et al.* (2018, p. 85). Desse modo, ficou evidente nas observações que ocorreu mais colaboração do que cooperação (KVAN, 2000, p. 413). O profissional G2-P-ARQ1, da SIN/UFRN, apesar de seu perfil pouco comunicativo, teve que apresentar maior interação que os demais, por centralizar as tarefas nos programas computacionais.

Houve a concentração das atividades relacionadas à categoria **meios de concepção** no profissional G2-P-ARQ1, que centralizou a maior parte das operações nos *softwares* computacionais. Apesar disso, o profissional G2-P-ARQ3 também teve acesso à modelagem CAD 3D, mas não ao modelo paramétrico. Apesar do modelo paramétrico desenvolvido, os profissionais G2-P-ARQ2 e G2-P-ARQ3 deram apenas contribuições nas discussões, sem fazer manipulação no modelo. Dentre as ferramentas de concepção utilizadas, estiveram o croqui, o modelo paramétrico no *Grasshopper* e o modelo geométrico do *Sketchup*. Assim como a equipe anterior, o G2-P optou por não utilizar o *Karamba3D*, claramente pela dificuldade de operação que tiveram com conceitos de engenharia estrutural.

A proposta projetual do **G2-P** apresentou ideia semelhante à do grupo anterior, do ponto de vista conceitual. As diferenças foram que o elemento geométrico básico do pórtico era pentagonal e o espaçamento entre eles, variado. Além disso, a questão da racionalização geométrica foi mais bem planejada, de modo a gerar apenas dois módulos básicos – um deles com duas variações, que poderiam ser dispostos para criar o efeito de rotação sem gerar inúmeros padrões de cortes diferentes. As representações do projeto se

ativeram aos desenhos gerais e ao detalhe construtivo do encaixe que fica nos vértices dos pentágonos (Figura 78).

Figura 78 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G2-P.



Fonte: G2-P na Oficina de Projeto Computacional.

O algoritmo parcial montado não possui muita sistematização e isso se deve ao fato de que os profissionais não o utilizaram como gerador de representações gráficas finais do projeto. Não é possível identificar zoneamento dos componentes e parâmetros algorítmicos no conjunto, tornando sua manipulação mais difícil pelos participantes.

As ações adotadas pela equipe colaborativa no processo de projeto, ao longo do tempo de execução da oficina de Projeto Paramétrico, podem ser consultadas no Apêndice D.

3.1.5.3 Grupo G3-P

Este grupo foi composto por quatro arquitetos, sendo três projetistas praticantes, e um professor que há muitos anos não tinha prática projetual, apesar de ter mais de 30 anos de formação. A média de formação dos demais profissionais está entre quatro e nove anos.

O planejamento das atividades do grupo, ocorrida na primeira semana, determinou basicamente duas diretrizes: o tipo de concepção colaborativa e o cronograma de atividades. A segunda semana ficou reservada para a apresentação das referências projetuais, a terceira, para o desenvolvimento da proposta, e a quarta, para a finalização da proposta.

A primeira ideia do grupo foi elaborar pilares com formato em leque, usando peças de madeira finas (ripas), devido ao seu baixo custo, que se desencontrariam para formar uma rotação sequenciada de elementos. A Figura 79 mostra os desenhos e diagramas produzidos e cujas soluções eram questionadas sobre como poderiam ganhar viabilidade construtiva.

Figura 79 – Primeiras ideias do G3-P.

Ação projetual:	• ESTUDO VOLUMÉTRICO	Ação projetual:	• ESTUDO VOLUMÉTRICO
Restrições:	• FORMAL	Restrições:	• SIMBÓLICA e FORMAL



Fonte: G3-P da Oficina de Projeto Computacional.

A partir do intervalo entre a primeira e a segunda semanas da etapa de concepção, o profissional G2-P-ARQ4 passou a desenvolver a proposta de modo centralizado, e foram aplicadas, em paralelo, as regras paramétricas no *Grasshopper*. Nesse momento, o grupo entrou em um impasse, pois o resultado da forma não estava agradando a todos (Figura 80). O grupo, então, decidiu partir para uma solução de pilares que se interconectavam sequencialmente e seguiu para a montagem do código (Apêndice I) a partir dessas premissas (Figura 81). Ainda não satisfeitos, propuseram mais uma alternativa, onde os pilares possuíam um efeito do tipo sanfona (Figura 82).

Figura 80 – Primeira alteração de projeto do G3-P no Sketchup e Grasshopper.

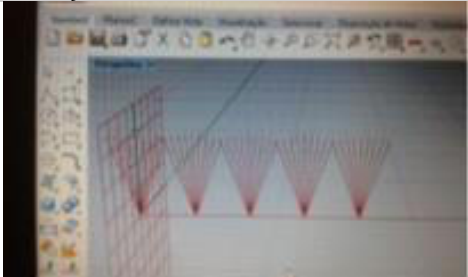
Ação projetual:	• CRIAÇÃO DE REGRAS	Ação projetual:	• CRIAÇÃO DE REGRAS
Restrições:	• FORMAL	Restrições:	• FORMAL



Fonte: G3-P da Oficina de Projeto Computacional.

Figura 81 – Segunda mudança no partido.

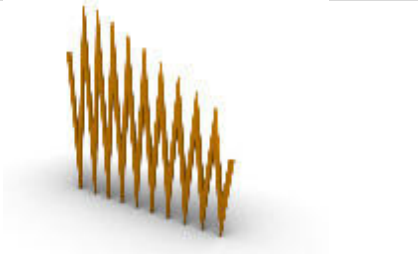
Ação projetual:	• CRIAÇÃO DE REGRAS e ESTUDO VOLUMÉTRICO	Ação projetual:	• CRIAÇÃO DE REGRAS
Restrições:	• FORMAL	Restrições:	• FORMAL

Fonte: G3-P da Oficina de Projeto Computacional.

Figura 82 – Mudança no partido.

Ação projetual:	• CRIAÇÃO DE REGRAS	Ação projetual:	• CRIAÇÃO DE REGRAS
Restrições:	• FORMAL	Restrições:	• FORMAL




Fonte: G3-P da Oficina de Projeto Computacional.

Os profissionais tiveram dificuldade de viabilizar a forma pretendida no *Grasshopper*, então associaram elementos geométricos do *Rhinoceros* ao modelo paramétrico para obter algo próximo do que gostariam. A partir daí, chegaram a uma proposta volumétrica.

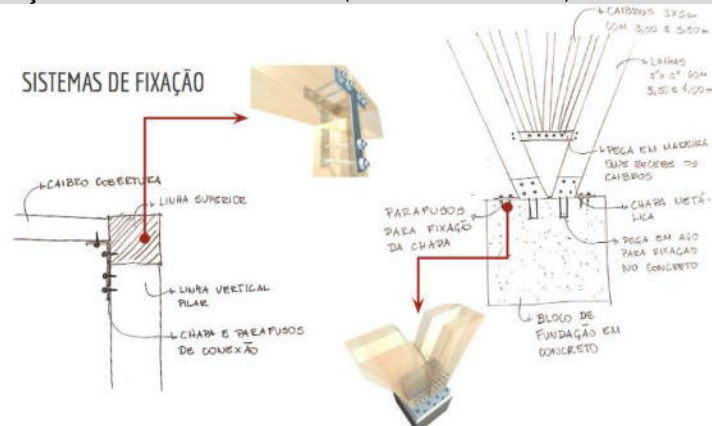
O grupo se concentrou em criar soluções formais, mas teve pouca preocupação em solucionar questões construtivas. A variabilidade de ângulos encontrados nos encaixes levaria à elaboração de um nó estrutural que previsse essas variações, mas a solução para resolver esse problema é genérica, e não foi pensado em como seria fabricado para atender aos requisitos necessários para acomodar os diversos ângulos (ver lado esquerdo da Figura 83). A única solução apresentada com efetividade construtiva foi a dos encaixes da base do pilar (ver lado direito da Figura 83), de onde saíam diversos elementos estruturais.

Figura 83 – Detalhes estruturais do G3-P.**Ação projetual:**

• ANÁLISE DE VIABILIDADE CONSTRUTIVA

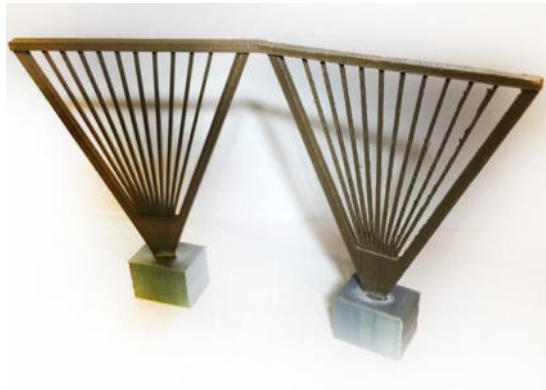
Restrições:

• PRÁTICA (de ordem construtiva)



Fonte: G3-P da Oficina de Projeto Computacional.

Um protótipo de um trecho do projeto foi materializado em impressora 3D, e devido à sua escala pequena, não foi possível simular as ligações estruturais. A peça foi impressa como um modelo completamente conectado, como mostra a Figura 84.

Figura 84 – Módulo do projeto do G3-P materializado em escala reduzida.

Fonte: G3-P na Oficina de Projeto Computacional.

Para o G3-P, o quesito **problema de projeto** mostrou relativo equilíbrio entre os quatro arquitetos. Todos colaboraram, com pesos diferentes e a depender das fases das discussões, para compreender e resolver os problemas de projeto que surgiram durante o processo.

De um modo geral, as questões de **construtibilidade** foram consideradas pelo grupo depois da consolidação das definições formais e, por isso, houve a dificuldade de desenvolver determinadas soluções efetivas. Outro motivo que pode explicar isso é a falta de experiência em execução por parte dos participantes desse grupo, pois à exceção do profissional G3-P-ARQ4, os demais tinham pouco tempo de formação. O profissional G3-P-

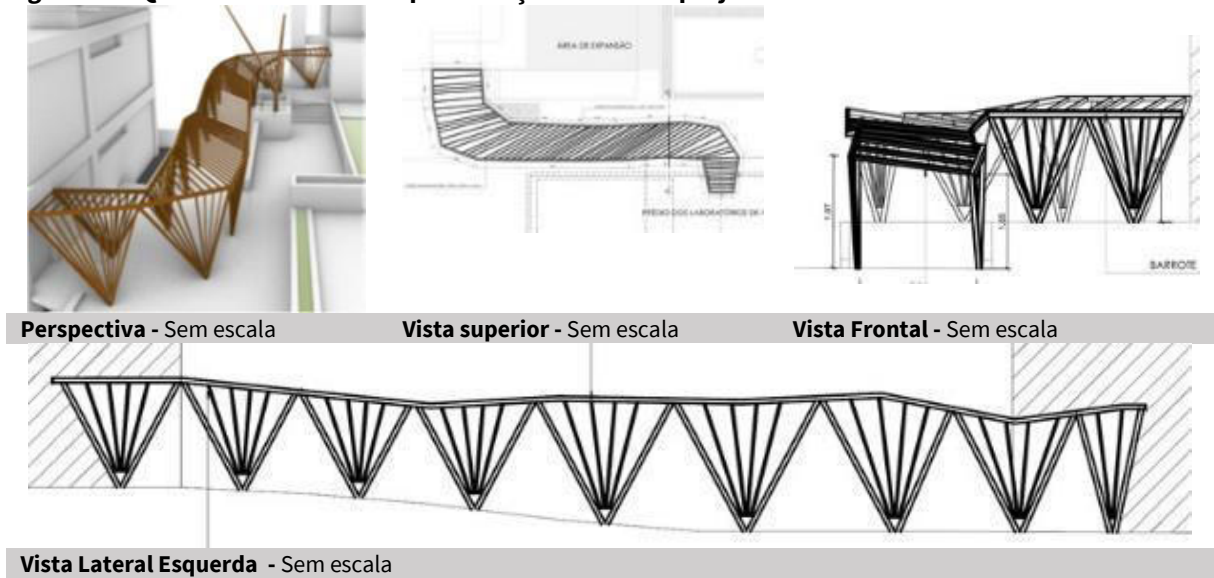
ARQ3, vinculado ao Mestrado profissional, possui atuação cotidiana como projetista de órgão público e, por essa razão, foi quem chamou mais a atenção para os outros quando se punha alguma dúvida sobre construtibilidade.

No tocante ao **projeto colaborativo**, a interação entre os participantes desse grupo indicou o perfil de liderança de um profissional que evoluiu bem na ferramenta paramétrica, tendo sido os demais participantes, de certo modo, conduzidos por ele. Assim, esse profissional figurou como líder vertical (MÜLLER *et al.*, 2018, p. 84), conduzindo um processo mais predominante de cooperação do que de colaboração Kvan (2000, p. 413). Por outro lado, as restrições construtivas passaram a ter importância menor diante das escolhas formais, estando a geometria no centro das discussões, que supostamente deveria ter contribuído com a resolução de questões construtivas. Contudo, como não houve relação próxima entre **geometria** e **construção** desde a concepção, e o grupo precisou realizar a pós-racionalização dos encaixes estruturais, levando a impasses e possíveis desajustes que deveriam ser potencialmente revistos na fase de obra.

A equipe basicamente apresentou o agrupamento dos profissionais em duas vertentes distintas: G3-P-ARQ2 e G3-P-ARQ4 preocuparam-se mais com questões de forma, enquanto os outros dois tinham mais preocupações construtivas. Os dois primeiros, contudo, conseguiram se sobrepôr no processo de projeto colaborativo.

Como já mencionado, na categoria **meios de concepção** as ferramentas de concepção adotadas durante o processo foram croquis, modelo paramétrico no *Grasshopper* e modelos geométricos do *Sketchup*. Os croquis foram centralizados no profissional G3-P-ARQ1, que tinha mais facilidade de desenhar e expressar rapidamente ideias discutidas pelo grupo. Esse grupo, assim como os anteriores, não utilizou o *Karamba3D*, provavelmente pelos mesmos motivos já apresentados.

A proposta final do G3-P (Figura 85) foi uma passagem coberta semipermeável com pilares triangulares.

Figura 85 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G3-P.

Fonte: G3-P na Oficina de Projeto Computacional.

As ações adotadas pelo grupo ao longo do tempo de execução da oficina de Projeto Paramétrico podem ser verificadas no Apêndice D.

3.1.5.4 Grupo G4-P

O G4-P contou com quatro profissionais, sendo três arquitetos e um engenheiro civil. Um dos arquitetos, o G4-P-ARQ1, detinha mais de 20 anos de formado, enquanto os outros dois arquitetos e o engenheiro civil possuíam até cinco anos de formação.

A primeira semana ficou reservada para definir a estratégia projetual, o agendamento das datas de trabalho, o partido arquitetônico e o modelo de colaboração entre os profissionais. A segunda semana foi destinada ao estudo volumétrico, definições de regras para o algoritmo e análise estrutural (liderada pelo profissional G4-P-ENG1). Já a terceira semana ficou dedicada à definição da documentação do projeto, análises “conclusivas” e preparação do material para apresentação.

Ao contrário dos demais grupos, o G4-P definiu previamente um conceito de projeto e, em seguida, buscou referências projetuais que se alinharam ao tipo de conceito escolhido. Os profissionais elegeram a composição de triângulos equiláteros, isósceles e escalenos que formava a treliça estrutural do Prédio dos Laboratórios de Arquitetura (Figura 86). Essa foi uma análise prévia de preexistências, apontando para o que é definido

por Lawson (2011, p.45) como etapa de análise. A síntese dessas informações ocorreu com a elaboração de um conceito, partindo do uso de triângulos que se distribuiriam pelo espaço de conexão entre os dois edifícios a serem conectados. A hachura marrom, de contorno escuro mais forte, (lado direito da Figura 86), determina a estrutura principal a ser projetada, ao passo que outras marcas em marrom no mesmo desenho indicam possíveis áreas de cobertura a serem implantadas no futuro.

Figura 86 – Definição de conceito do projeto.



Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

A partir do estudo da preexistência e da definição do partido, o grupo estudou quatro referências para embasar o desenvolvimento de seu projeto. Depois de estudadas as referências, o grupo estabeleceu três diretrizes estruturantes para o seu projeto: 1) integrar a cobertura às edificações existentes; 2) possibilitar a expansão da coberta, caso fosse necessário; e 3) valorizar as visuais da estrutura.

Na segunda semana de Oficina, os primeiros estudos do grupo alternaram entre o desenvolvimento da forma e a sua viabilidade construtiva. O profissional G4-P-ARQ3 apontou uma ideia de explorar triângulos equiláteros para o desenvolvimento da proposta e a partir daí o grupo centrou as suas discussões (Figura 87). O argumento era de que haveria a possibilidade de otimização geométrica da proposta e isso poderia facilitar a fabricação. No mesmo encontro, o profissional G4-P-ARQ1 sinalizou que haveria a possibilidade de utilizar os dois prédios como elementos estabilizadores da estrutura, e o profissional G4-P-ENG1 indicou o uso de *parabolts*, ou barras roscadas, que poderiam atravessar as estruturas de concreto existentes, para contraventar a estrutura de madeira.

Figura 87 – Primeiras ideias do G4-P.

Ação projetual:	• ESTUDO VOLUMÉTRICO	Ação projetual:	• ANÁLISE DE VIABILIDADE CONSTRUTIVA
Restrições:	• FORMAL	Restrições:	• PRÁTICA (construtiva)



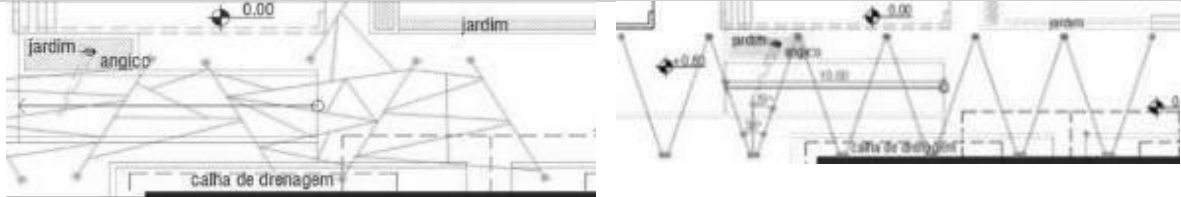
Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

O impasse que ficou até o final do segundo encontro foi de como dispor os triângulos no projeto. Os profissionais se preocuparam de a forma não ter complexidade suficiente, quando então pensaram em propor que os triângulos tivessem regularidade apenas quando fossem projetados em planta e suas alturas variariam parametricamente.

O grupo passou a sentir a necessidade do uso de representações mais precisas, testando a disposição dos triângulos em desenhos geométricos e modelagem/modelação geométrica, para dar mais acuracidade e para que pudessem prever maiores conflitos da geometria proposta (Figura 88). Essa iniciativa foi tomada pelo profissional G4-P-ARQ3, o mesmo que havia demonstrado preocupação com a otimização de material.

Figura 88 – Ordenamento de geometria do G4-P.

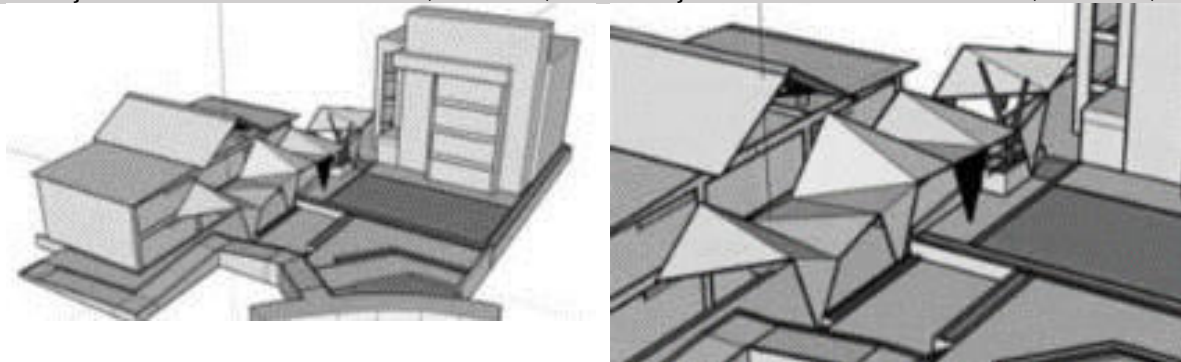
Ação projetual:	• ESTUDO VOLUMÉTRICO	Ação projetual:	• ESTUDO VOLUMÉTRICO
Restrições:	• FORMAL e PRÁTICA	Restrições:	• FORMAL e PRÁTICA



Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

Figura 89 – Ordenamento de geometria do G4-P.

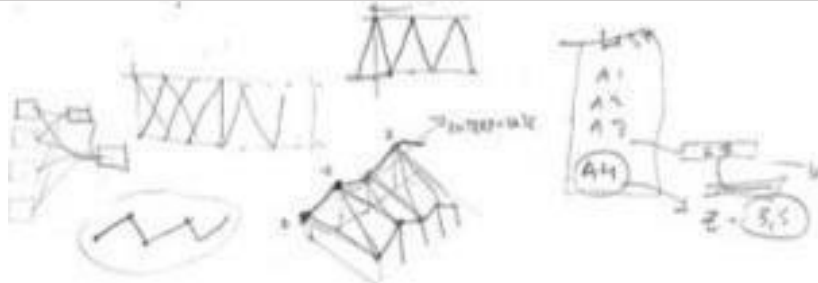
Ação projetual:	• ESTUDO VOLUMÉTRICO	Ação projetual:	• ESTUDO VOLUMÉTRICO
Restrições:	• FORMAL e PRÁTICA (construtiva)	Restrições:	• FORMAL e PRÁTICA (construtiva)



Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

Figura 90 – Criação do algoritmo do G4-P.

Ação projetual:	• CRIAÇÃO DAS REGRAS
Restrições:	• FORMAL e PRÁTICA (construtiva)



Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

Depois de definidas as posições dos pilares, marcados por pontos circulares na Figura 89, foi feito um primeiro modelo geométrico, com representação simplificada de planos triangulares no espaço, para checar a relação da geometria criada com as preexistências (edifícios, acessos e árvore). A partir desse ordenamento geométrico, os conflitos foram minimizados, dando mais dinamicidade ao processo de projeto e convergindo para o surgimento de soluções arquitetônicas e estruturais mais viáveis. Essas ações demonstraram que o grupo integrou, desde as primeiras ideias, conhecimentos de **geometria** e **construção**, utilizando parâmetros computacionais para definir geometricamente os elementos construtivos, tendência constatada por Florio (2012, p.44).

Na criação do código (Apêndice I), os profissionais decidiram não associar a modelagem/modelação a nenhuma instância do *Rhinoceros*, e começaram a partir de pontos no *Grasshopper* que se distribuíram conforme o efeito de uma sanfona, projetados em planta. Os parâmetros definidos para esses pontos foram: a distância entre eles no eixo Y; a quantidade de cópias nessa mesma direção; e a altura de cada um deles. A partir destes pontos, foram criadas as linhas, que vieram a ser os eixos das peças estruturais. Com isso, foram gerados os triângulos previamente idealizados, com controle paramétrico das alternativas desejadas pelos profissionais. Tais linhas criadas no modelo paramétrico foram a base para a geração dos perfis estruturais, dimensionados mais precisamente em fase posterior no modelo paramétrico estrutural.

A geração de alternativas possibilitou determinar duas definições importantes para o projeto: a primeira, de ordem arquitetônica, quando puderam verificar qual das alternativas de composição dos triângulos ficaria mais harmônica; a segunda, de ordem

construtiva, dizia respeito especialmente aos pontos de apoio da estrutura, tanto no solo, pelas fundações, quanto nos edifícios preexistentes. Assim, puderam planejar o ponto de contato das estruturas de madeira propostas em elementos estruturais de concreto dos edifícios construídos.

Depois de definido o código básico contendo geometria, o grupo passou a perceber que teria o desafio de resolver como ficaria a ligação estrutural entre as peças de madeira utilizadas no projeto, especialmente as ligações viga-viga e pilar-vigas. Isso gerou a necessidade de criação de uma peça de articulação em aço, onde estariam conectadas as peças de madeira. O profissional G4-P-ENG1 ficou encarregado de projetar a ligação estrutural, mas não conseguiu progredir. Ele trouxe a discussão para o grupo colaborativo e a ligação estrutural começou a ser pensada pelos profissionais G4-P-ARQ1 e G4-P-ARQ2.

Eles usaram como diretriz a criação de uma ligação metálica articulada universal. A solução foi usar um conjunto de chapas metálicas cortadas e soldadas, que fixariam as diferentes peças de madeira através de parafusos e porcas. A regra era que essa ligação estrutural pudesse ser utilizada em todos os nós, independentemente da variação de ângulo.

Devido à sua pouca experiência com projetos em madeira, o profissional G4-P-ENG1 decidiu fazer a validação da solução encontrada para a ligação estrutural junto a um professor da UFRN, do curso de engenharia civil, especialista em estruturas de madeira, que confirmou haver viabilidade estrutural e construtiva na solução proposta pelo grupo.

O passo seguinte foi a simulação do comportamento estrutural do projeto. Essa simulação foi feita considerando apenas as linhas do modelo paramétrico, devido ao pouco conhecimento do engenheiro civil na ferramenta. Mesmo assim, foi possível extrair uma informação muito importante para o projeto. Com as simulações realizadas, os resultados mostraram aos projetistas que a estrutura ficaria mais otimizada caso as ligações dos pilares com o solo fossem do tipo engastadas e os seus encontros com as vigas, como ligações rotuladas. A utilização de ligações pilar-viga rotuladas permitiu que os momentos não fossem transmitidos para as vigas. Segundo o grupo, “... o modelo estrutural considerado (Figura 92) foi pensado de maneira a simplificar a ligação viga-pilar”. De acordo com modelo estrutural proposto pelo grupo, “... o elemento 1 deve ser dimensionado à flexo-

compressão, o elemento 2 à flexo-tração e o elemento 3 à flexão simples” (G4-P da Oficina de Projeto Paramétrico).

Figura 91 – Criação de detalhes estruturais.

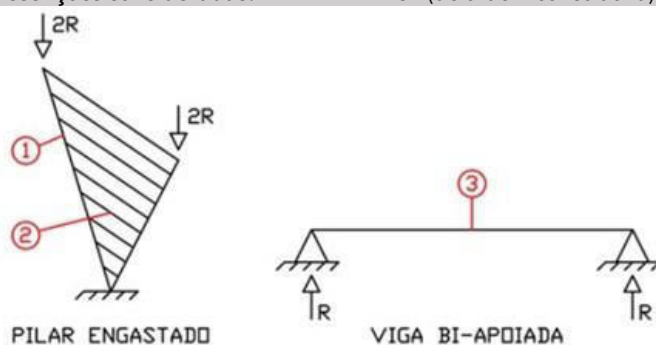
Ação projetual:	• ANÁLISE DE VIABILIDADE CONSTRUTIVA	Ação projetual:	• ANÁLISE DE VIABILIDADE CONSTRUTIVA
Restrições:	• PRÁTICA (construtiva)	Restrições:	• PRÁTICA (construtiva)



Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

Figura 92 – Modelo estrutural proposto.

Tipo de ação projetual:	• CRIAÇÃO DE MODELO ESTRUTURAL
Restrições consideradas:	• PRÁTICA (de ordem construtiva)



Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

Após a elaboração do modelo estrutural, foi feita a escolha do material, o pré-dimensionamento e definiram-se as cargas. A partir dessas definições, partiram para a análise estrutural do modelo computacional no *Karamba3D*. Segundo os profissionais, é nesta fase em que

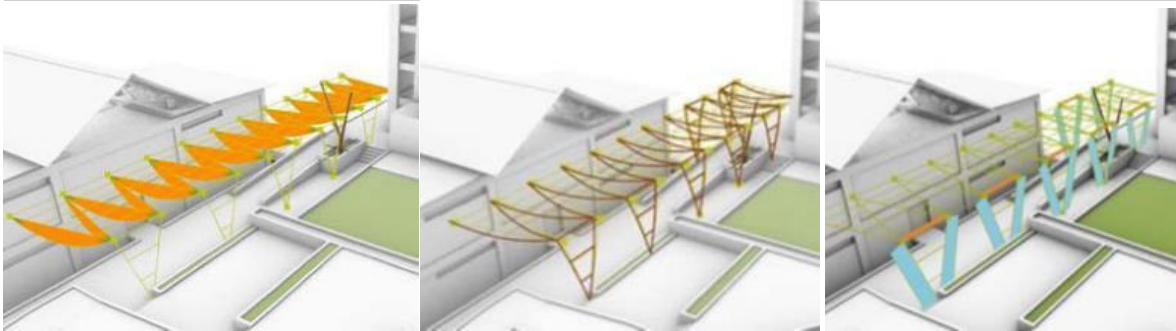
... são obtidos os esforços atuantes em cada elemento e a configuração deformada da estrutura. Em seguida, na fase de dimensionamento, comparam-se os esforços atuantes com os esforços resistentes. No caso desse projeto, porém, a análise estrutural pôde ser realizada dentro da mesma plataforma do projeto arquitetônico (G4-P da Oficina de Projeto Computacional, 2019).

O G4-P destacou a importância de se trabalhar na mesma plataforma para definir questões arquitetônicas e de engenharia, ampliando a colaboração entre os profissionais a cada oportunidade em que havia alteração, seja na arquitetura ou em aspectos da

engenharia estrutural. A seguir, os resultados do que foi produzido pelo grupo em termos de análise e dimensionamento das peças. As simulações realizadas foram de diagrama de momento fletor, conformação deformada da estrutura e de esforço normal, contendo as partes da estrutura que estavam submetidas à tração e à compressão (Figura 93).

Figura 93 – Análises estruturais do projeto do G4-P.

Ação projetual:	• ANÁLISE ESTRUTURAL PARAMÉTRICA
Restrições:	• PRÁTICA (construtiva)



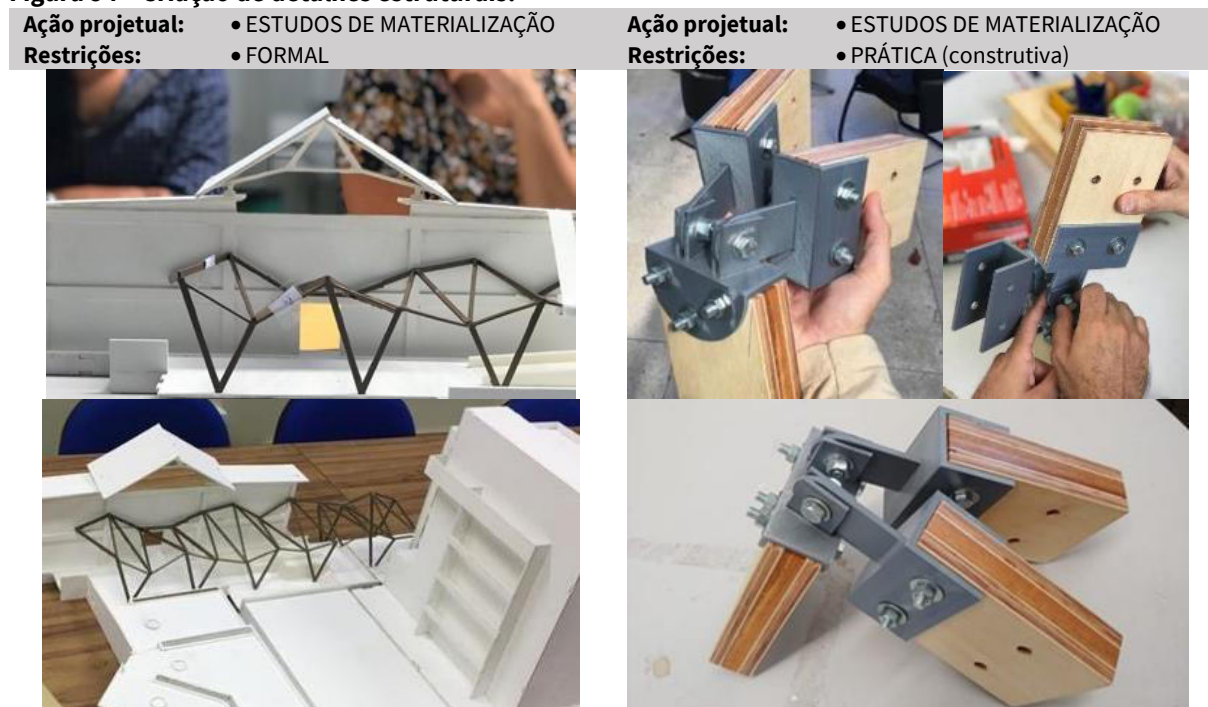
Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

Além do *Karamba3D*, cálculos manuais foram utilizados para obtenção dos esforços, indicando que os profissionais, sejam eles arquitetos ou engenheiros, devem ter competências multimeios e multidomínios, conforme defende Lebahar (1999, p.45).

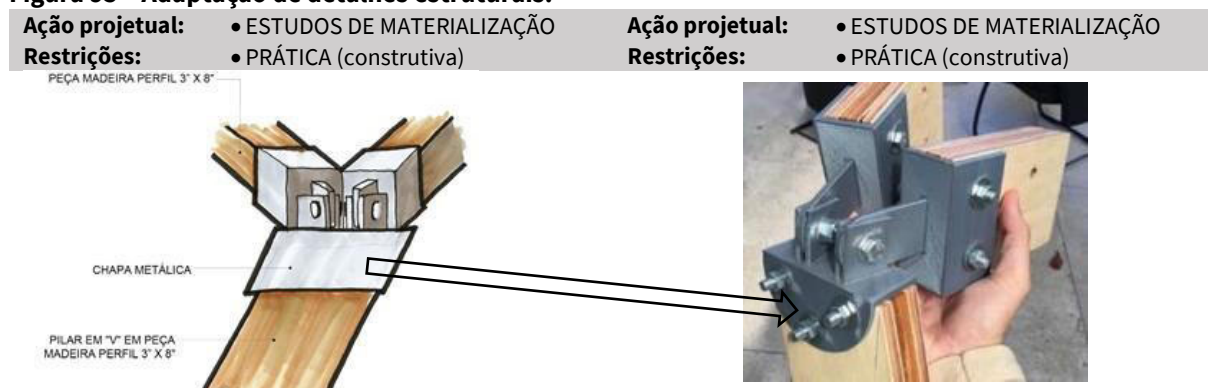
A etapa seguinte foi de *materialização* do projeto. Como havia sido estabelecido no princípio, o projeto vencedor do concurso de ideias seria materializado em duas diferentes abordagens. A primeira, com a criação de um protótipo de escala reduzida, contendo todo o entorno e projeto, e a segunda, um protótipo em escala natural de detalhe construtivo. Como o projeto do G4-P foi o vencedor, os dois protótipos foram produzidos (Figura 94).

Para o protótipo maior, considerando que a escala do modelo era muito pequena, foi preciso fazer algumas simplificações, especialmente nas ligações. A prototipagem da ligação estrutural foi feita em escala 1:2, devido à limitação de tamanho da impressora 3D utilizada. As peças de madeira foram cortadas e perfuradas, e a ligação metálica impressa em 3D. Os parafusos, porcas e arruelas eram reais.

Nessa fase, foram identificados problemas no conector metálico. Como há diversas angulações dos pilares do projeto geradas pelas diferentes alturas, o encaixe genérico antes planejado só atendia a um dos ângulos, pois encamisaria o pilar completamente (Figura 95 – lado esquerdo).

Figura 94 – Criação de detalhes estruturais.

Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

Figura 95 – Adaptação de detalhes estruturais.

Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

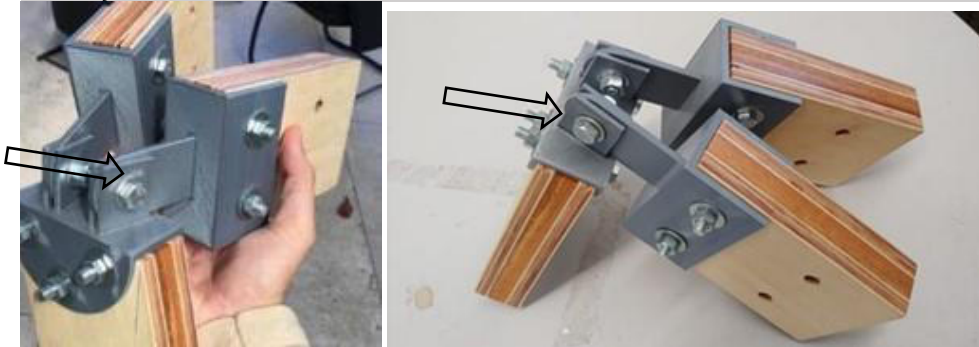
O segundo problema detectado na ligação estrutural foi de ordem articular. A composição de chapas duplas que fica na cabeça do pilar (Figura 96) e que recebe as vigas não tem altura suficiente para permitir o giro das vigas com inclinação inferior a 15°. Contudo, algumas vigas do projeto ficaram com angulação menor que essa. Seria necessário, em etapa futura, aumentar a altura das peças.

Figura 96 – Identificação de pouca altura nas chapas receptoras das vigas.**Ação projetual:**

• ESTUDOS DE MATERIALIZAÇÃO

Restrições:

• PRÁTICA (construtiva)



Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

Foram verificadas mais duas inconsistências construtivas. A primeira, a tolerância de folga dos furos da chapa e das peças de madeira, para que pudesse haver um ajuste e acomodação no momento de inserir e travar as peças de madeira no conector. A outra questão foi o posicionamento dos pilares do modelo paramétrico, que deveriam estar excêntricos em relação ao nó estrutural, de modo a conseguir ajustar o conector metálico.

No quesito **problema de projeto**, o processo de projeto do G4-P permeou entre a constante análise de restrições formais e construtivas, que guiaram o processo. Vale salientar que um dos profissionais, além de possuir prática como projetista, é mestrando acadêmico na linha de pesquisa em projeto.

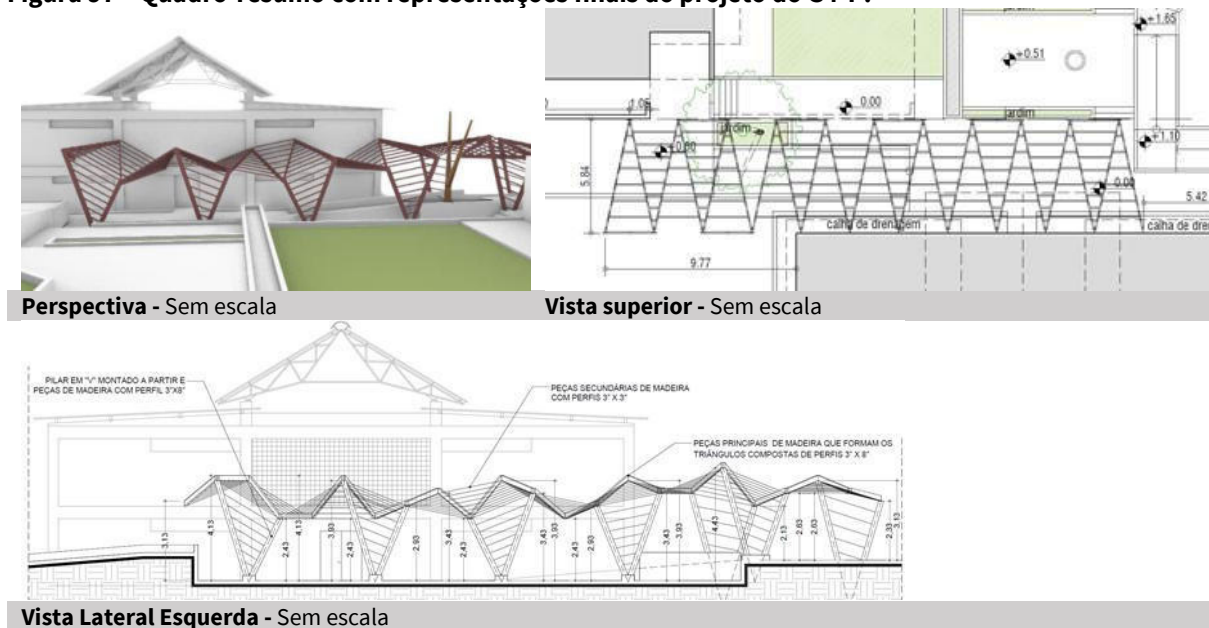
As discussões sobre a **construtibilidade** giraram em torno de três aspectos. O primeiro foi em relação à otimização de material; o segundo relativo às ligações estruturais; e o terceiro, o dimensionamento estrutural do conjunto. Todos esses aspectos foram discutidos nas fases iniciais da concepção, o que contribuiu para guiar o processo de projeto mais efetivamente no tocante à sua futura construção.

No quesito **projeto colaborativo**, a integração entre os profissionais desse grupo funcionou de modo muito equilibrado, em um ambiente de alta colaboração e pouca cooperação (KVAN, 2000, p. 413). Todos os quatro contribuíram em todos os momentos e tiveram perfil comunicativo e de troca de ideias constante, levando a sucessivos momentos de troca de liderança horizontal (MÜLLER *et al.* (2018, p. 84). O profissional G4-P-ARQ1, com sua experiência em projeto e construção, normalmente tendo a última palavra no que dizia respeito a aspectos técnicos; o profissional G4-P-ARQ2, com muita sistematização no

processo de projeto e habilidade em elaborar croquis rapidamente do que estava sendo discutido; o profissional G4-P-ARQ3, com forte perfil de liderança nas fases iniciais, e que trouxe a preocupação com a pré-racionalização geométrica; enquanto que o profissional G4-P-ENG1, a todo tempo contribuindo com a questão estrutural, de detalhes construtivos e montagem do código no *Grasshopper*.

Os **meios de concepção** e representação do projeto que foram aplicados foram croquis, desenhos técnicos, modelagem/modelação geométrica, modelagem/modelação paramétrica no *Grasshopper*, simulação estrutural no *Karamba3D*, cálculos estruturais manuais. No momento da entrega, modelagem/modelação em plataforma BIM, para extração da documentação do projeto (plantas, cortes e elevações). A seguir, a Figura 97 mostra as representações produzidas pela equipe.

Figura 97 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G4-P.



Fonte: G4-P da Oficina de Projeto Computacional.

As ações da equipe foram categorizadas e distribuídas ao longo do tempo, em quadro-resumo do processo de projeto colaborativo, e podem ser consultadas no Apêndice D.

3.1.5.5 Grupo G5-P

Este grupo contou com três arquitetos e um engenheiro civil. Foi o que apresentou mais diversidade na formação dos profissionais. O profissional mais experiente possuía 32

anos de formação, outro possuía 14 anos, e os outros dois detinham quatro e dois anos de graduação, respectivamente.

No primeiro encontro da etapa de concepção, os profissionais montaram um cronograma com estratégias de colaboração (Quadro 8).

Quadro 8 –Estratégias de colaboração previstas pelo G5-P.

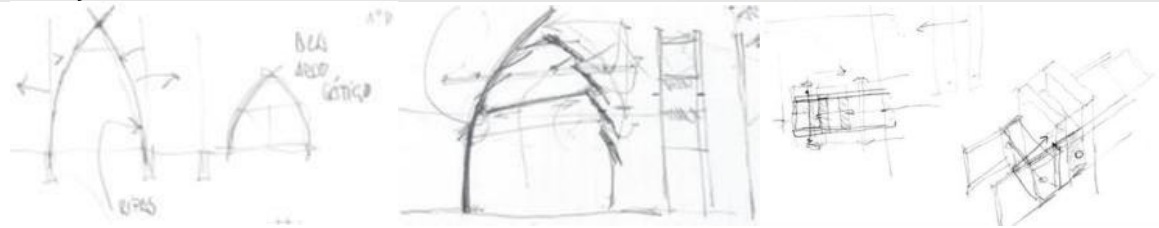
Períodos	Atividades para a etapa de concepção
29/05/2019	• Viabilização da comunicação • Criação de Grupo em aplicativo de conversas instantâneas • Familiarização com sistemas construtivos em madeira
29/05/2019 a 05/06/2019	• Reconhecimento dos materiais disponíveis e estudo preliminar das seções • Discussão por método analógico para a obtenção de conceito e proposta preliminar • Estabelecimento de elementos paramétricos e não paramétricos
05/06/2019 a 12/06/2019	• Concepção do código e Imersão na modelagem/modelação paramétrica

Fonte: adaptado do planejamento realizado pelo G5-P na Oficina de Projeto Paramétrico.

Após os estudos de referência, foi construído o conceito do projeto do grupo. Eles remeteram ao conceito do arco e flecha, onde o arco seria o elemento principal do projeto e a torção dos pilares seria dada pelo tracionamento de uma trave de madeira de mesma espessura, gerando um pórtico rígido (Figura 98). Essas peças de madeira também serviriam para suportar as telhas. Por ter sido inspirada na arquitetura indígena brasileira, a solução resgatou o simbolismo de sua **geometria** e de seus **processos construtivos**.

Figura 98 – Primeiras ideias do projeto.

Ação projetual:	• ESTUDO VOLUMÉTRICO e ANÁLISE DE VIABILIDADE CONSTRUTIVA
Restrições:	• SIMBÓLICA, FORMAL E PRÁTICA (construtiva)



Fonte: G5-P da Oficina de Projeto Computacional.

Tão logo foi definido esse sistema de pórtico, eleito como o módulo embrionário do projeto (Figura 99), os profissionais iniciaram a indicação de materiais. Para as fundações, escolheram tubos de PVC que serviriam de fôrma para o recebimento do concreto armado. Antes da concretagem, seriam inseridas duas peças de madeira, servindo de base para a ancoragem dos pilares. As fixações dos pilares nessa ancoragem seriam feitas com parafusos, arruelas e borrachas de vedação. Para gerar proteção para os pedestres,

escolheram telha transparente ondulada, a única opção dessa natureza disponível na lista de materiais fornecida.

Figura 99 – Definição de estudos volumétricos do G5-P.

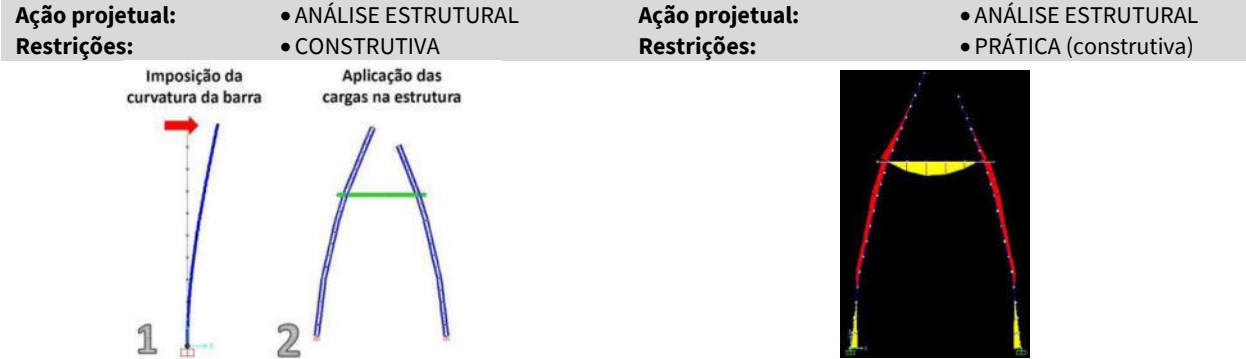


Fonte: G5-P da Oficina de Projeto Computacional.

Em seguida, o profissional G5-P-ENG1 verificou, com cálculos manuais, as deformações dos elementos estruturais propostos, que em seguida foram simulados computacionalmente. O resultado (Figura 100) mostra a direção da força a ser imposta e os tipos de esforços (tração e compressão) a que os pilares e viga estão submetidos. Para a simulação, foram considerados que os apoios dos pilares seriam engastados, e as ligações entre os pilares e vigas, rotuladas. Como os pilares trabalhariam tracionados, era de extrema importância realizar a verificação de deformações, para impor a força necessária para que pudesse ser amarrada a travessa horizontal de madeira que manteria a estrutura deformada.

Depois da elaboração do módulo básico e da simulação de seu comportamento estrutural, o grupo passou a se concentrar no planejamento do código. Essa tarefa ficou bastante centralizada no profissional G4-P-ARQ1, tanto por possuir mais disponibilidade e maior habilidade na manipulação do *Grasshopper*, quanto por ter o perfil de liderança vertical da equipe.

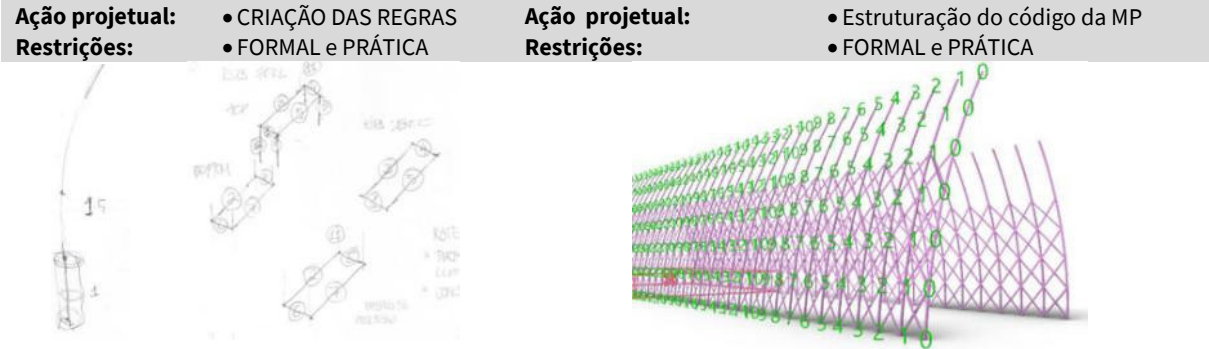
Figura 100 – Análises estruturais do módulo básico do projeto do G5-P.



Fonte: G5-P da Oficina de Projeto Computacional.

O processo de criação do código no *Grasshopper* (Figura 101) iniciou-se com um ponto e a partir dele foi gerado, em sequência, um círculo que se extrudou com medida negativa no eixo Z para gerar a fundação, que possuía 1,00 metro de profundidade. A supraestrutura iniciou-se com a criação do pilar de madeira, que possuía outros dois pontos, além daquele da base, para dar subsídio à criação de um arco. Este, por sua vez, foi extrudado em duas direções para gerar o volume da ripa, duplicada em seguida. A movimentação dos parâmetros desses pontos provocava a deformação do arco. O módulo básico foi replicado pela extensão do caminho a ser percorrido. O passo seguinte foi realizar a subdivisão dos pilares, para criar a trama de ripas de travamento, dispostas na diagonal. Pode-se dizer que foi a etapa de maior dificuldade do grupo, pois precisaram realizar o gerenciamento de lista de dados no *Grasshopper* para combinar a seleção de pontos.

Figura 101 – Criação do algoritmo do G5-P.



Fonte: G5-P da Oficina de Projeto Computacional.

Paralelamente ao desenvolvimento do código (Apêndice I) no *Grasshopper*, o grupo decidiu materializar o projeto com dois protótipos (Figura 102). O primeiro, um modelo em madeira em escala reduzida, que representou pilares, a trama de ligação entre eles, e as vigas. O modelo ajudou a testar proporções e curvaturas, subsidiando a

modelagem/modelação paramétrica. O segundo protótipo foi o *mock-up* de um pilar, com o mesmo material e dimensões da obra, em escala 1:1. Esse recurso permitiu aos profissionais mudarem de ideia quanto à obtenção da curvatura dos pilares. Perceberam a dificuldade de armar a estrutura, no momento da construção, e optaram pela alternativa de realizar o deslizamento entre as duas madeiras do pilar, obter a inclinação e, em seguida, fixar com parafusos passantes, para que a inclinação fosse obtida fora do canteiro/estaleiro de obras.

Na quarta semana da etapa de *concepção*, o grupo declarou: “**a parametrização do projeto permitiu a variação da geometria, de maneira a determinar a curvatura máxima que os elementos poderiam suportar**, abarcando as etapas de análise estrutural e verificação da resistência das seções quase que simultaneamente” (G5-P da Oficina de Projeto Paramétrico, 2019, *grifo nosso*). Isto indicou que a forma do projeto esteve constantemente ligada às capacidades do material construtivo adotado, indicando uma forte relação entre a **geometria** e as **propriedades construtivas** dos materiais, em processo similar ao que foi observado no projeto Toledo Gridshell, analisado no capítulo anterior.

Figura 102 – Materialização de soluções durante o processo de projeto do G5-P.



Fonte: G5-P da Oficina de Projeto Computacional.

O estudo aprofundado do **problema de projeto**, para esse grupo, teve extrema importância, pois contribuiu para definições no estudo da forma, ocorrendo por meio do uso de diversos recursos e habilidades que esteve ao alcance dos profissionais. O profissional G5-P-ARQ1, projetista da SIN/UFRN, é também doutorando, e liderou a apresentação de um método de resolução de problemas muito bem estruturado e fluido.

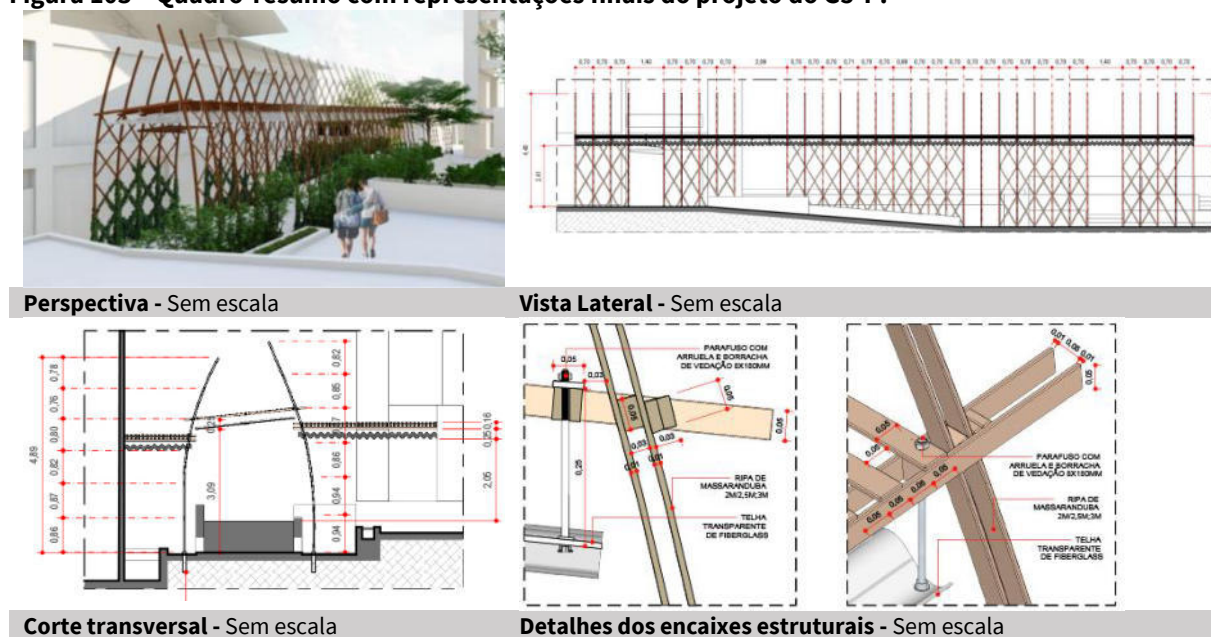
Requisitos necessários à **construtibilidade** do objeto arquitetônico sempre estiveram presentes. Desde a escolha simbólica do conceito, que exigiu a interpretação de

métodos construtivos da arquitetura indígena brasileira, passando pela construção do modelo paramétrico e culminando com a produção de modelos em escala reduzida e do *mock-up*. De todos os grupos, esse foi o único que tomou a iniciativa de produzir um *mock-up*, especialmente feito durante o processo de projeto, para validar as ideias. Os testes realizados no *mock-up* foram úteis para testar o comportamento da torção da madeira. O tipo de solução projetual do grupo, de ter pilares feitos apenas com duas ripas, obviamente facilitou a produção do protótipo do pilar, visto o baixo custo do material e mão-de-obra. O procedimento foi acompanhado de perto pelo profissional G5-P-ARQ1 que, normalmente centralizava decisões construtivas no projeto.

No quesito **projeto colaborativo**, houve uma clara troca de informações entre os profissionais, liderada verticalmente pelo G5-P-ARQ1, que conduzia as discussões e negociações. O profissional G5-P-ARQ2 também teve perfil de liderança forte na equipe, apesar de não tanto quanto o anteriormente citado. Ambos foram as lideranças verticais (MÜLLER *et al.* (2018, p. 84) que atuaram em momentos de colaboração e cooperação nos moldes estabelecidos por Kvan (2000, p. 413). Foram os dois que mais produziram durante o processo de projeto. O profissional G5-P-ARQ3, com menos tempo de formado, contribuiu na elaboração das primeiras ideias, mas teve participação mais efetiva na documentação do projeto. O engenheiro, G5-P-ENG1, por sua vez, colaborou com o grupo nos cálculos e simulações de comportamento estrutural, sendo menos comunicativo, apenas confirmando ou refutando possibilidades sugeridas pelos arquitetos.

Uma gama de **meios de concepção** e representação do projeto foi usada durante o processo. Desde o croqui e cálculos manuais, passando por modelos computacionais de cálculo estrutural (SAP2000), modelagens/modelações paramétrica e geométrica, renderizações e desenhos técnicos. Apesar de sua habilidade no *Grasshopper* e *Karamba3D*, o profissional G5-P-ENG1 não os aplicou.

A proposta final apresentada pelo G5-P (Figura 103) foi uma passarela semipermeável e linear, cercada por peças de madeira leve (ripas), em que pilares de ripas duplas torcidos foram entrelaçados por ripas simples na diagonal. Elas foram o principal impasse durante a modelagem/modelação paramétrica, pois exigiu a compreensão do gerenciamento de lista de dados.

Figura 103 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G5-P.

Fonte: G5-P da Oficina de Projeto Computacional.

O Apêndice D, mostra as ações projetuais do G5-P, tomadas ao longo do tempo de realização do experimento de projeto 01.

3.1.5.6 Grupo G6-P

Assim como os dois grupos anteriores, o G6-P contou com três arquitetos e um engenheiro civil. Os profissionais G6-P-ARQ1, G6-P-ARQ2 e G6-P-ENG1 possuíam tempo de formação semelhante, por volta de dez anos, enquanto o profissional G6-P-ARQ3 tinha apenas quatro anos de formado.

O planejamento do grupo foi dividido em atividades programadas para cinco datas. Na primeira ocasião, seriam desenvolvidas as ideias preliminares, classificadas como estudo de propostas e eleição da proposta a ser desenvolvida. Sugeriu-se o desenvolvimento de um processo de projeto colaborativo nos moldes de concurso interno de ideias. Depois, seriam desenvolvidas as atividades de modelagem/modelação paramétrica, detalhamento e conclusão.

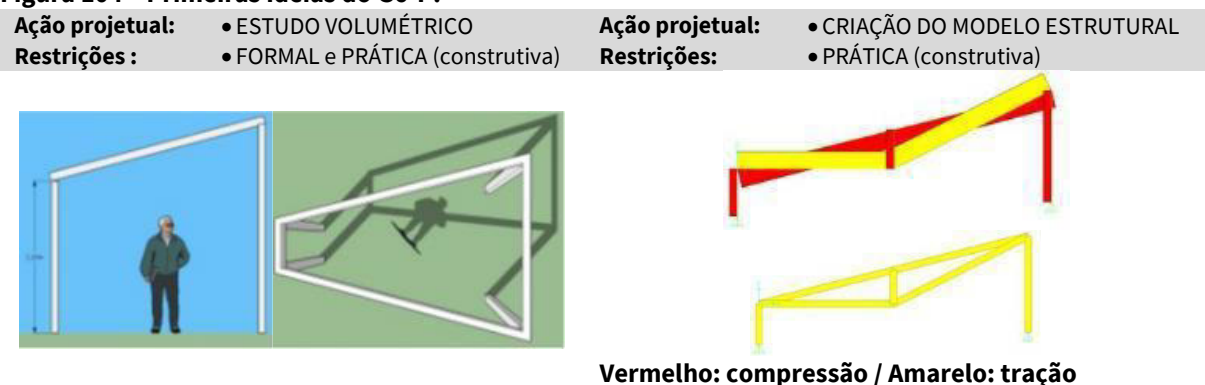
A partir da análise inicial do material fornecido no enunciado do exercício de *concepção*, os profissionais elencaram dilemas e traçaram metas a serem alcançadas. A primeira dessas relações associou conexão *versus* expansão, indicando que escolhas por soluções arquitetônicas passíveis de composição com possíveis futuras estruturas. A

segunda, forma *versus* viabilidade, definindo a forma adequada aos materiais disponíveis. Por fim, a relação forma *versus* drenagem, em que seria definida estrutura capaz de atender ao sistema de drenagem pluvial.

A única referência projetual estudada foi a obra do designer e artista de papel Peter Dahmen, que desenvolve obras de arte dobráveis em papel. Foram trazidas duas imagens potencialmente inspiradoras para o grupo. A última delas tornou-se a meta formal para os profissionais. Esse consenso surgiu naturalmente durante o processo, apesar de os profissionais terem, no início, planejado fazer concurso interno de ideias para chegar à proposta.

A influência da referência formal foi tão forte, que os projetistas a definiram como sendo o conceito que seria adotado. Foi desenvolvida modelagem/modelação geométrica para uma melhor compreensão do rebatimento da ideia, lançando possíveis problemas que surgiriam ao longo do processo de projeto. Iniciou-se, então, a discussão entre os arquitetos e engenheiro civil sobre duas questões. A primeira relativa à **geometria e comportamento estrutural** do módulo proposto. Segundo o engenheiro civil, para vencer vãos grandes, seria interessante usar, para os elementos horizontais da cobertura, a viga-vagão, composta apenas por madeiras e encaixes por parafusos passantes.

Figura 104 – Primeiras ideias do G6-P.



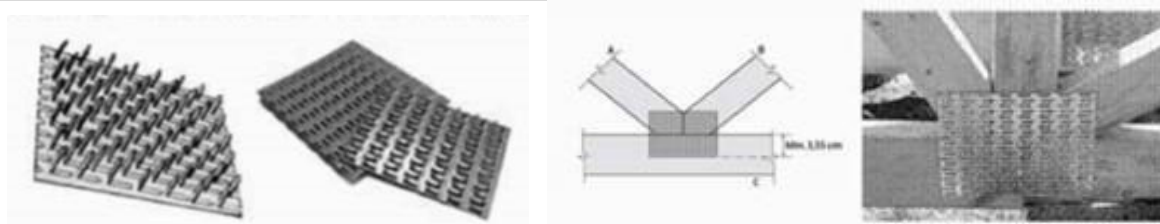
Fonte: G6-P da Oficina de Projeto Computacional.

A segunda questão tratou dos tipos de ligação entre as barras que compunham o projeto. O lado esquerdo da Figura 105 mostra que tipo de ligações foi pensado nas primeiras ideias, quando foi cogitado o uso de chapas com dentes estampados para promover a fixação, especialmente nas articulações, da estrutura previamente proposta.

No instante em que o grupo pensou as soluções até aqui apresentadas, o módulo básico do projeto já continha as proporções e dimensões desejadas, mas a relação com o todo ainda não havia sido pensada. Nesse momento, só existiam diretrizes para a aplicação no todo, que foram, segundo o G6-P: “...**verticalidade** dos elementos de apoio (pilares); altura mínima: 2,20m; uso da **forma trapezoidal** para os trechos curvos; **variar a altura dos pilares para sugerir movimento** da forma (G6-P da Oficina de Projeto Paramétrico, 2019, *grifo nosso*).

Figura 105 – Definição de encaixes estruturais do G6-P.

Ação projetual:	• Análise de viabilidade construtiva
Restrições:	• Prática (construtiva)



Fonte: G6-P da Oficina de Projeto Computacional.

A partir dessas diretrizes, sem recorrer a qualquer outro tipo de representação, como fez todos os grupos anteriores (com a utilização de croquis e/ou outras estratégias analógicas), os profissionais do G6-P deram início ao modelo paramétrico. Nos ambientes do *Rhinoceros* e *Grasshopper*, usaram uma abordagem de fixar pontos diversos no modelo geométrico do *Rhinoceros*, arranjados conforme um trapézio projetado em planta, e os vincularam a pontos no *Grasshopper*. Já em ambiente paramétrico, moveram esses pontos no eixo Z, que vieram a compor as linhas-eixo de pilares. Determinaram que haveria o controle de alturas nesse eixo Z com parâmetros que viriam a ser o seu principal mecanismo de geração de alternativas do projeto. A interligação desses pilares, a partir de suas alturas, geraria as vigas e, no final, todos esses perfis lineares ganhariam espessura (Figura 106).

Figura 106 – Montagem do algoritmo do G6-P.**Ação projetual:**

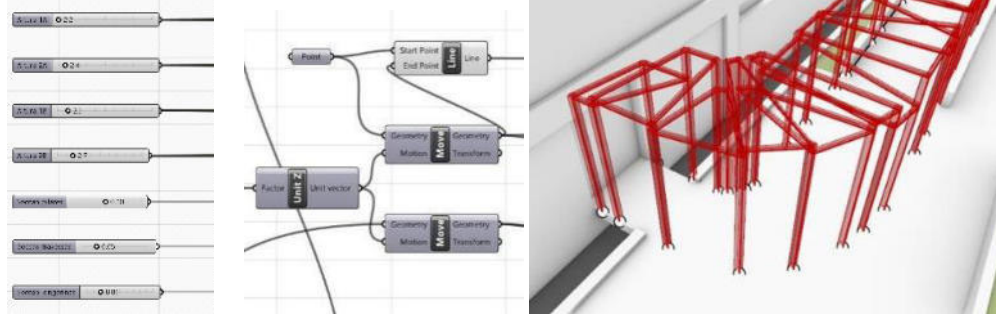
• MODELAGEM PARAMÉTRICA – criação do código

Restrições:

• FORMAL

- Construção de pontos associados ao pilar

- Resultado na tela do Rhinoceros



Fonte: G6-P da Oficina de Projeto Computacional.

À medida que a proposta avançou e ganhou controle com parâmetros, os profissionais declararam ter escolhido a proporção desejada por eles. Informaram que a diferença anteriormente imaginada entre a altura dos pórticos deveria ser maior, mas a avaliação de alternativas dada pelo modelo paramétrico lhes permitiu perceber que essa diferença, de apenas 30 centímetros, daria a movimentação desejada por eles.

Depois de encontrar a forma adequada, o uso das chapas com dentes estampados para fixação dos elementos estruturais de madeira (Figura 107) foi substituído pelo uso de parafusos passantes, para atender aos requisitos da lista de materiais e para dar mais durabilidade, já que os parafusos podem ser substituídos mais facilmente do que as chapas. Isso deu à proposta final pilares duplos e vigas simples.

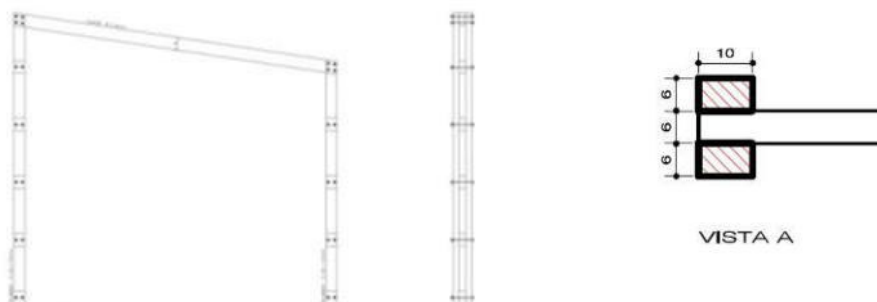
A solução estrutural foi validada com o auxílio do *add-on Karamba3D* (Figura 108). O modelo foi construído apenas com linhas, e foram inseridas cargas para leitura qualitativa do comportamento estrutural do módulo básico do projeto.

Figura 107 – Definição de conceito do projeto.**Ação projetual:**

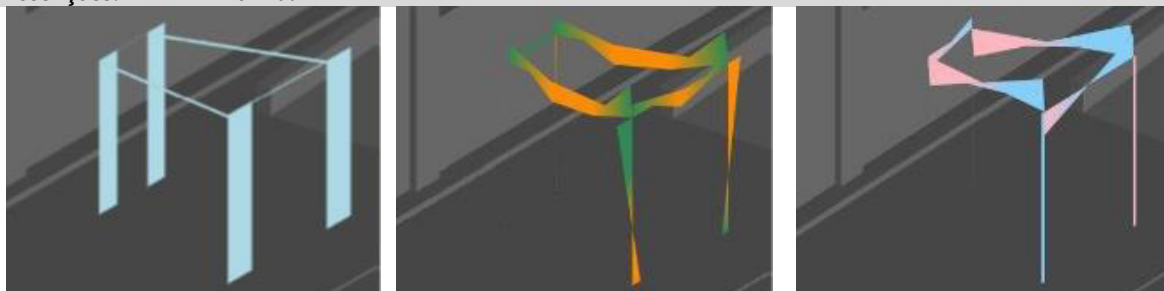
• Análise de viabilidade construtiva

Restrições:

• Prática (construtiva)



Fonte: G6-P da Oficina de Projeto Computacional.

Figura 108 – Análise estrutural do projeto do G6-P.**Ação projetual:** • Análise estrutural paramétrica**Restrições:** • Formal

- Esforço normal

- Momento fletor

- Constante

Fonte: G6-P da Oficina de Projeto Computacional.

O **problema de projeto** apontou que o G6-P teve uma postura de adotar e avaliar poucas ideias, sem o estudo de muitas alternativas. Isso se refletiu negativamente no estudo da forma proposta. Apesar de a solicitação de criação de geometria complexa apontar certa subjetividade, a equipe colaborativa entendeu que atingiria a forma complexa solicitada no enunciado apenas pela variação de alturas dos pórticos, o que efetivamente não aconteceu.

O aspecto de destaque no quesito **construtibilidade** diz respeito a uma declaração feita pelo engenheiro civil, G6-P-ENG1, quando informou que a geometria e os encaixes, em projetos de madeira, são colocados como prioridade em detrimento do dimensionamento mínimo. É comum, segundo ele, que modelos estruturais de madeira tenham relativo superdimensionamento. Isso se aplicou no modelo proposto pelo grupo no instante em que propuseram peças duplas de madeira para os pilares. O motivo foi exclusivamente para viabilizar os encaixes, quando o dimensionamento apontou que seria necessário perfil estrutural simples, ao invés de duplo. Essa relação estreita entre a geometria proposta e sua maneira de construir indicou a necessidade de **racionalizar a geometria** a partir da **capacidade construtiva** da solução que estavam a propor, indicando o que Ahlquist e Menges (2011, p.19) citam como o estabelecimento de métodos de interrelação entre comportamentos, formas e forças.

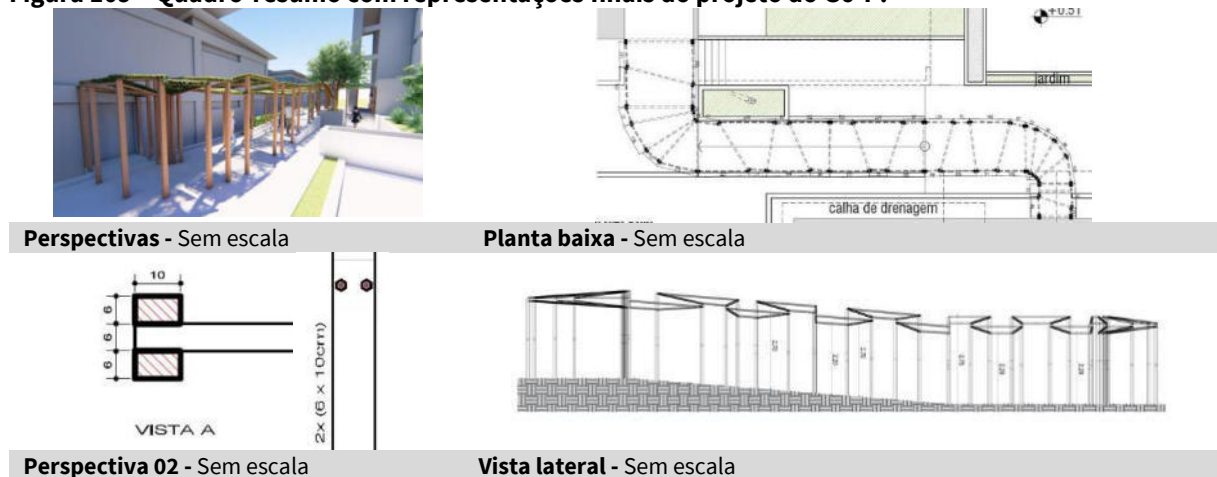
No tocante ao **projeto colaborativo**, percebeu-se o domínio das decisões centradas no profissional mais experiente. A colaboração entre os demais membros aconteceu, porém ficou perceptível a interação natural entre os profissionais G6-P-ARQ1 e G6-P-ENG1. Os outros dois arquitetos, G6-P-ARQ2 e G6-P-ARQ3, fizeram menos intervenções durante o

processo, concentrando-se mais no período de definição da ideia inicial e na preparação da documentação do projeto. Tais aspectos mostraram a liderança vertical (MÜLLER *et al.* (2018, p. 84) do G6-P-ARQ1, que em alguns momentos compartilhou a liderança com o profissional G6-P-ENG1. A predominância do trabalho da equipe foi cooperativo, em detrimento do colaborativo Kvan (2000, p. 413).

O uso dos **meios de concepção** representou, para o G6-P, o lançamento das primeiras ideias em modelagem/modelação geométrica, e em seguida a aplicação de uma metodologia de modelagem/modelação paramétrica. A falta de um amadurecimento prévio da ideia com ferramentas como o croqui dificultou o processo de projeto, pois limitou o grupo a não testar outras possibilidades. Como a criação do modelo paramétrico ficou centralizada com um profissional, houve uma aparente acomodação por parte dos outros profissionais envolvidos, uma vez que já havia uma solução de montagem do código (Apêndice I), mesmo não sendo ideal, na opinião da maioria.

A proposta final do G6-P resultou em uma sequência de pórticos de formato trapezoidal projetados em planta, com alternância de alturas, e que interligados formaram passagem permeável nas laterais (Figura 109).

Figura 109 – Quadro-resumo com representações finais do projeto do G6-P.



Fonte: G6-P da Oficina de Projeto Computacional.

As ações projetuais da equipe foram distribuídas ao longo tempo, e podem ser consultadas no Apêndice D.

3.1.6 Os produtos gerados

Ao término da etapa de concepção, os projetos apresentados e entregues pelos grupos foram analisados pelo júri que compôs o concurso interno de ideias. Todos os seis grupos enviaram as propostas finais, algumas originalmente fiéis ao que foi apresentado à comissão julgadora, outras com itens incorporados a partir dos comentários dos professores. Os projetos resultantes dos exercícios de concepção (Figura 110) traduziram, em maior ou menor escala, o atendimento aos requisitos do enunciado lançado, em especial às questões relativas à construtibilidade do objeto arquitetônico, já que se tratava de uma obra a ser executada em futuro próximo.

Figura 110 - Propostas arquitetônicas apresentadas pelos grupos.



Fonte: Participantes da ação integrada.

Em termos de solução formal, a proposta do **G1-P** foi criar uma passagem semipermeável, do ponto de vista dos acessos, gerada a partir de um pórtico triangular equilátero que sofria rotações sucessivas ao longo do eixo longitudinal da forma, gerando assim movimento ao longo do percurso. O **G2-P** apresentou proposta semelhante, do ponto de vista conceitual. As diferenças foram que o elemento geométrico básico do pórtico era pentagonal e o espaçamento entre eles era variado. O projeto do **G3-P** também criou solução de passagem semipermeável, apoiada por pilares em formato de leque, que se conectavam por pérgolas para formar a cobertura. A proposta do **G4-P** é uma grande

cobertura, apoiada parte nos edifícios existentes, parte em pilares de formato “V”, composta por faces que, projetadas em planta, tem formato de triângulos isósceles. O **G5-P** apresentou proposta que possuía passagem fechada, com aberturas planejadas estrategicamente nos acessos aos edifícios e à área da praça existente. O **G6-P**, por fim, propôs uma sequência de pórticos de formato trapezoidal em planta, com alternância de alturas que, interligados formam uma passagem permeável nas laterais.

A comissão julgadora analisou os projetos baseando-se na observância ao atendimento dos requisitos estabelecidos no enunciado do exercício de concepção. Depois de cada um dos membros da comissão votar individualmente, foi criada uma média dos votos recebidos por cada proposta, quando se chegou ao resultado (Quadro 9).

Quadro 9 - classificação das equipes no concurso de ideias.

Classificação no concurso de ideias	Identificação das equipes
1º Lugar	G4-P
2º Lugar	G5-P
3º Lugar	G2-P
Menções honrosas	G1-P, G3-P e G6-P (em ordem numérica)

Baseado no que foi emitido de opinião pelos membros do júri, foi montado o Quadro 10, mostrando o atendimento ao que foi solicitado no enunciado do exercício de concepção. Vale salientar que, apesar do atendimento a esses critérios ser base essencial para a apresentação de um bom produto arquitetônico, essa tabela não reflete obrigatoriamente o julgamento do concurso de ideias. O julgamento foi, como anteriormente descrito, fruto da votação dos professores da disciplina, da ação de extensão e outros convidados.

Quadro 10 – Atendimento aos requisitos do enunciado do exercício de concepção.

Grupos de profissionais Restrições do enunciado	G1-P	G2-P	G3-P	G4-P	G5-P	G6-P
	Colaborativo 1 – apenas arquitetos			Colaborativo 2 – arquitetos e engenheiro civil calculista		
Uso dos materiais	△	△	△	▷	△	△
Complexidade formal	△	△	△	△	△	▽
Preexistências	▷	△	△	△	▽	▷
Modelagem paramétrica	△	▽	△	△	△	▷
Construtibilidade	▷	△	▽	△	△	△
Legenda:	△ Atendeu; ▷ Atendeu parcialmente; ▽ Não atendeu					

A modalidade de concurso de ideias trouxe, como aspecto positivo, o engajamento das equipes, e uma taxa de desistência extremamente baixa: apenas dois de 24 profissionais

inscritos na atividade a abandonaram. Dada a grande importância de se investir tempo e dedicação no aprendizado de ferramentas paramétricas, como defende Woodburry (2010, p.47), o engajamento mencionado fez com que os profissionais tenham se dedicado em horários além daqueles estabelecidos pela Oficina, o que confluuiu para bons resultados.

3.1.7 Análise dos resultados

A análise realizada neste capítulo irá comparar os seis grupos colaborativos que participaram da Oficina de Projeto Paramétrico. Foram utilizados critérios qualitativos, conforme descrito pelas categorias de análise, detalhadas no capítulo 3.

Do ponto de vista do **problema de projeto**, o memorial entregue pelas equipes apresentou vasta pesquisa relativa aos problemas de projeto colocados no enunciado do exercício, seja no estudo de referências projetuais, na consulta à lista de materiais disponíveis ou na busca por informações técnicas que contribuíssem com soluções projetuais. Isso pode ter sido alcançado devido à experiência dos participantes da ação com a pesquisa, visto que eram, majoritariamente, mestres acadêmicos ou mestrandos profissionais vinculados ao PPAPMA. Além disso, com exceção das equipes G1-P e G4-P, havia pelo menos um doutor ou doutorando.

Em sua maioria, os projetistas responderam, no formulário eletrônico aplicado, que as três primeiras restrições de projeto envolvem, predominantemente, restrições funcionais, construtivas, orçamentárias e formais. Contudo, como as respostas consideraram projetos não paramétricos, as restrições podem mudar dramaticamente, e isso foi observado nos processos de projeto das seis equipes colaborativas do experimento 01. Na maioria das equipes, a restrição predominante no início dos processos foi a formal. A prática, de caráter construtivo, começou a aparecer logo em seguida à anterior, mostrando que em processos de projeto paramétrico as restrições projetuais podem ter uma dinâmica diferente, trazendo aos arquitetos e engenheiros uma nova maneira de projetar.

Levando em consideração a **construtibilidade**, as restrições impostas no início do processo foram fundamentais para dar realidade e viabilidade ao exercício proposto, e isso

foi um item bastante estudado pelos grupos, especialmente nas fases iniciais, na fase de análise do problema de projeto, apontada por Lawson (2011, p.45). Em cada equipe, existia pelo menos um profissional com experiência prática na atuação em canteiro/estaleiro de obras e na relação com equipes de produção, especialmente aqueles vinculados à SIN/UFRN. Isso fez com que tivessem familiaridade com as listas SIPAC, assim como contribuiu para que antevissessem questões ligadas à fabricação das peças de madeira e suas conexões, a serem produzidas pelos marceneiros da UFRN.

Se comparados os grupos de 01 a 03 (colaborativo entre arquitetos – CP1) com os grupos de 04 a 06 (colaborativo entre arquitetos e engenheiro civil – CP2), foi possível perceber a diferença no momento de discussão dos aspectos de construtibilidade. Na categoria colaborativa CP2, as discussões apresentaram aspectos de construtibilidade desde as fases iniciais.

Ao mesmo tempo em que essa diversidade de formação da equipe colaborativa foi positiva nos processos de projeto dos grupos 04 e 05, como defendem Oxman e Oxman (2010), teve um efeito limitador no G6-P. Os profissionais que lideraram esta última equipe levaram a restrição construtiva tão radicalmente, que isso tolheu a liberdade criativa e a busca por alternativas de formas mais complexas, tendo sido um reflexo também da falta de estudo de alternativas para a resolução do problema de projeto, etapa anteriormente analisada.

A área de intervenção do projeto e a disponibilidade de materiais foram, na opinião dos profissionais, o que mais restringiu e guiou o seu projeto. Projetos paramétricos que não tem como limitante o entorno podem ter mais liberdade do que os que são desenvolvidos em área livre.

Na análise do ponto de vista do **projeto colaborativo**, tiveram destaque os grupos compostos por arquitetos com maior tempo de formação, colaborando multidisciplinarmente com o profissional da engenharia civil. A presença desses dois perfis projetando colaborativamente desenvolveu projetos com maior rigor técnico construtivo, trazendo mais atenção a enfoques como montagem, mão-de-obra, logística e aspectos estruturais. A congregação desses aspectos esteve presente mais enfaticamente nos grupos

04 e 05, os únicos que contaram com dois arquitetos com mais de 20 anos de formação e experiência em projeção, e tinham engenheiros civis.

De modo específico, ficou claro que os profissionais com mais de 20 anos de graduação (G4-P-ARQ1 e G5-P-ARQ1), à exceção do profissional G3-P-ARQ4 (que não projetava há tempos), tinham muita segurança no que propunham, especialmente destacando como suas soluções poderiam ser construídas. Eles, juntamente com os engenheiros, pensavam em resolver a materialidade desde que surgiam as primeiras ideias. No contexto inverso temos os grupos 05 e 06, com arquitetos de alto nível de reflexão construtiva e que normalmente detinham a palavra final, possivelmente pelo fato de os engenheiros civis terem pouco tempo de formados.

A atuação de diferentes perfis em uma equipe de projeto, no contexto da complexidade da arquitetura contemporânea, é fundamental, como defendem Oxman e Oxman (2010). Contudo, os resultados desse experimento mostram que o perfil experiente em obra do arquiteto pode ser um fator de peso, podendo interferir na condução dos processos de projeto.

Quando considerado o quesito **meios de concepção**, quanto maior foi a exploração de multimeios de concepção e representação, especialmente croquis, modelagem/modelação geométrica e modelagem/modelação paramétrica, de natureza geométrica e de análise estrutural, mais quesitos do enunciado de projeto conseguiram ser alcançados e maior qualidade teve o projeto final.

Observou-se, em diferentes níveis, desenvolvimento de competências de áreas multimeios e multidomínios, apresentados por Lebahar (1999, p.45). Houve grupos que utilizaram em maior e menor intensidade representações diversas de projeto, como o croqui, desenhos técnicos, modelagem/modelação geométrica e BIM (*Building Information Modeling*).

Observou-se que as equipes que utilizaram uma grande quantidade recursos puderam explorar melhor as variáveis envolvidas no processo, tendo mais alternativas para embasar suas decisões. A presença de pelo menos um profissional com forte interesse em ferramentas computacionais de projeto em cada equipe foi fundamental para a boa condução do processo de projeto, mas não foi suficiente.

O agrupamento de diversidades em uma equipe colaborativa de projeto pareceu impactante, na análise dos resultados desse experimento. Pôde-se perceber como é difícil encontrar um perfil profissional que consiga concentrar todos os conhecimentos apontados nas categorias de análise propostas para esta tese. O arranjo dos grupos, em especial os grupos 04 e 05, portanto, demonstrou a importância da presença de perfis profissionais que tenham habilidades distintas, para que processos de projeto paramétricos sejam mais bem resolvidos, e os produtos projetuais tenham maior viabilidade construtiva.

A partir da análise das ações dos grupos durante os processos de projeto do Experimento 01 foi possível perceber que eram compostos por profissionais que combinavam as seguintes habilidades:

- Boa sistematização de ideias para emergir na compreensão do problema de projeto;
- Conhecimento de tecnologias construtivas do material utilizado;
- Perfil de liderança para uma boa condução da equipe colaborativa;
- Alta habilidade em meios de concepção projetual analógicos;
- Raciocínio lógico e matemático;
- Alta habilidade em meios de concepção projetual digitais.

Do ponto de vista das restrições de projeto de que trata Lawson (2011, p.106), os processos de projeto de todas as equipes tiveram como primeira restrição de projeto a formal. A partir dela, as restrições práticas começaram a surgir, mas em momentos distintos das equipes colaborativas. Quando possuem engenheiros civis e/ou arquitetos muito experientes, observou-se que as restrições práticas, especialmente de ordem construtiva e orçamentária, surgiram paralelamente à formal, e começaram a ganhar força ao longo do processo. Isso fez com que fossem diminuídos os retrabalhos e as equipes pudessem guiar o processo de projeto com menos questionamentos acerca da construtibilidade do objeto arquitetônico. Essa tarefa ficou facilitada apenas no G6-P, que apesar de propor um projeto exequível, não ousou como as outras equipes no tocante à complexidade da forma, o que trouxe um pouco mais de facilidade na condução do processo.

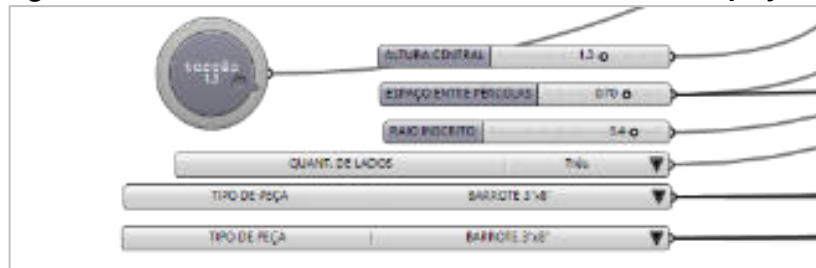
Apesar de todas as análises, sabe-se que os processos de projeto são incertos, complexos e não possuem apenas algumas saídas, mas diversas alternativas (LAWSON,

2011, p.198). Isso levou a resultados distintos no tocante à verificação da hipótese. Caso não haja, na equipe de projetistas, membro com domínio de construtibilidade de edifícios, dificilmente os aspectos construtivos podem ser considerados, a exemplo do que se pôde observar com o G3-P. Outra questão que pode invalidar essa hipótese é a dificuldade com a ferramenta, como aconteceu com o G2-P. Isso se agrava ainda mais quando os profissionais que lideraram, nos grupos de projeto, a construção do modelo paramétrico, tem dificuldade de entender o processamento de dados em árvore, essenciais para o controle e categorização das partes do modelo paramétrico, para que a eles possam ser atribuídas características construtivas.

Foi verificado, ainda nesta etapa de análise, o atendimento de cada grupo à hipótese lançada, que **a percepção da construtibilidade, quando priorizada desde as fases iniciais por equipes colaborativas, contribui para o projeto paramétrico, fazendo com que os aspectos construtivos sejam integrados à modelagem e consequentemente facilitem a materialização do edifício.**

No **G1-P** observou-se que a primeira das restrições foi a formal. Percebeu-se, então, uma crescente aparição de restrições práticas, especialmente de ordem construtiva e orçamentária, a partir da segunda semana de trabalho da equipe. Isso aconteceu com o amadurecimento da proposta, que passou a sair de níveis de incerteza para tomar forma mais definida, e a equipe passou a levar em consideração a construtibilidade do objeto arquitetônico com mais preocupação. Pode-se dizer, nesse caso, que a partir da segunda semana, a construtibilidade foi priorizada desde as fases iniciais do processo de projeto, ajudando a sistematizá-lo, o que confirma a hipótese lançada. Os aspectos construtivos foram incorporados na modelagem através de um painel de controle, em que poderiam ser manipulados geometria e tipos de elementos estruturais (Figura 111).

O segundo aspecto, da produção de detalhamentos construtivos dos encaixes no modelo paramétrico, que não foram produzidos. Isso pode ser explicado pelo pouco tempo para execução da Oficina, pois elaborar um detalhe paramétrico exigiria mais experiência com a ferramenta e mais horas dedicadas ao modelo.

Figura 111 – Painel de controle com elementos estruturais do projeto do G1-P.

Fonte: G1-P da Oficina de Projeto Computacional.

Para o **G2-P**, as restrições que surgiram no início do processo de projeto foram, paralelamente, de ordem formal e prática (de caráter construtivo). À medida que a ideia foi avançando, mudanças na forma foram acontecendo, a maior parte delas motivada por questões construtivas e funcionais (de acessos, especialmente). A construtibilidade começa ser priorizada a partir da metade do processo, à medida que se aproximava o término do prazo para o desenvolvimento do projeto e apresentação da ideia para o júri do concurso de ideias. Desse modo, houve a confirmação parcial da hipótese lançada, uma vez que os profissionais tiveram dificuldade no manuseio da modelagem/modelação paramétrica e, de certo modo, se acomodaram com o uso de um *software* que era mais confortável para eles. Isso fez com que a ferramenta tenha sido usada apenas para fazer testes de solução de volumetria. O pouco tempo para execução da Oficina pode ter colaborado para isso, apesar de não ter impedido outros grupos de terem desenvolvido suas propostas integralmente na ferramenta.

As restrições de projeto do **G3-P** foram essencialmente de ordem formal. O projeto passou por diversas formas até chegar à definição que equalizou as ideias dos profissionais. Pode-se dizer, portanto, que a forma foi priorizada, em detrimento de sua viabilidade construtiva. A construtibilidade não foi priorizada, não contribuindo para a sistematização do projeto ao longo do seu desenvolvimento. Isso trouxe a conclusão de que a **hipótese** não foi atendida. Adicionalmente, não foram observadas características construtivas no modelo paramétrico. Isso ocorreu devido à prioridade significativa que os profissionais deram à questão formal e à dificuldade que tiveram no manuseio da ferramenta.

Quanto ao **G4-P**, as restrições de projeto alternaram-se entre formal e construtiva, desde as primeiras ações projetuais. O simbolismo do uso do triângulo esteve presente no princípio, mas as outras duas restrições foram as mais recorrentes. Pode-se dizer que a

construtibilidade foi constantemente priorizada durante o processo de projeto, pois a todo momento a equipe discutia aspectos relacionados a ela, confirmando assim a hipótese. A verificação de soluções geométricas alternativas para o posicionamento dos triângulos possibilitou a análise de pontos de contraventamento do objeto arquitetônico proposto nos edifícios existentes. Complementarmente, a simulação estrutural no *Karamba3D* possibilitou aos profissionais uma análise integrada dos modelos, tendo um arquivo único para a colaboração entre projetistas, o *master model* defendido por Klinger (2008, p.29).

A análise do processo de projeto do G5-P confluiu para a confirmação da hipótese lançada pela tese. Apesar de as restrições formal e simbólica terem sido aparentemente as iniciais, a construtibilidade foi priorizada de modo recorrente durante a projeção, desde as etapas preliminares. Como resultado, as informações obtidas por meio de estudos realizados antes da elaboração do modelo paramétrico já haviam sido suficientes para resolver grande parte dos problemas de ordem construtiva. O controle paramétrico de deformação e a escolha de perfis de madeira, informações oriundas destas pesquisas iniciais, ajudaram aos profissionais no processo de escolha final de geometria.

Considerando o G6-P, a hipótese também foi confirmada. Apesar disso, trouxe uma consequência somente observada nesse grupo: a preocupação extrema com o rigor técnico prejudicou a liberdade formal. A construtibilidade e o manuseio da ferramenta paramétrica interferiram demasiadamente na qualidade plástica do projeto, gerando limitações nos resultados. A modelagem/modelação paramétrica contribuiu para condensar os aspectos construtivos do objeto arquitetônico, quando a nova verificação de proporções da forma (especialmente os vãos dos apoios dos pilares) permitiu ao grupo repensar os tipos de encaixe. Isso eventualmente teria acontecido sem o modelo paramétrico, mas levaria mais tempo. Outro aspecto foi a utilização do comportamento estrutural do módulo no *Karamba3D*, que deu mais subsídios ao grupo para confirmar o modelo estrutural pensado na etapa anterior.

A verificação da hipótese no início da pesquisa foi resumida em um quadro, que sinaliza como cada um dos seis grupos do Experimento 01 se comportou diante da hipótese lançada (Quadro 11).

Quadro 11 - Confirmação da hipótese da tese para o Experimento 01.

Grupos de profissionais	G1-P	G2-P	G3-P	G4-P	G5-P	G6-P
Hipótese da Tese	Colaborativo 1 – apenas arquitetos			Colaborativo 2 – arquitetos e engenheiro(a) civil calculista		
Status	△	▷	▽	△	△	△
Legenda: △ Hipótese confirmada ; ▷ Hipótese confirmada parcialmente ; ▽ Hipótese não confirmada						

Ao avaliar o quadro-resumo, percebe-se que os grupos colaborativos da categoria CP2 (com a presença de engenheiros civis) teve a confirmação da hipótese lançada. Quando da não presença de engenheiro civil na equipe (grupos G1-P a G3-P), houve variabilidade na confirmação da hipótese, que pode ter sido fruto das diferentes maneiras de interação entre os grupos, assim como do perfil profissional da equipe.

3.2 Experimento 02: *Geometric and Generative Modeling* (Lisboa/Portugal)

Com a finalidade de analisar como a construtibilidade interfere em processos de projeto paramétricos na fase de formação do arquiteto, realizou-se, no período de outubro a dezembro de 2019, o segundo experimento desta tese.

Signatária do Processo de Bologna⁹, a Universidade de Lisboa segmenta os cinco anos de formação dos profissionais de nível superior, sendo os três primeiros anos destinados à graduação e os dois últimos ao mestrado (*master*). Contudo, como o mestrado é cursado, na maioria dos casos, seguido da graduação, raramente os arquitetos apenas graduados iniciam a sua atuação como projetistas. Por essa razão, o experimento 02 não possui as mesmas condições de aplicação que o experimento 01 (mestrado profissional na UFRN), visto que os atores envolvidos não possuem a imersão na prática profissional como projetistas. Isso faz com que os dois experimentos não possam ser diretamente comparados, apesar da tentativa de aproximação de diversas condições de projeto fornecidas nos exercícios de concepção dos dois experimentos.

A falta de prática profissional dos estudantes impossibilitou, por exemplo, a aplicação de formulário eletrônico para levantar a experiência profissional previamente trazida pelos projetistas (a exemplo do que foi aplicado no experimento 01), pois praticamente todas as questões lançadas diziam respeito à prática cotidiana dos projetos. A leitura do perfil dos estudantes foi feita, portanto, em função da origem de sua nacionalidade, e as informações obtidas dos perfis foram processadas durante e após a realização do exercício de concepção projetual, que será mais adiante descrito. No entanto, essas peculiaridades do caso não eliminam a pertinência do experimento para fins de teste da hipótese de pesquisa.

A estrutura dos subtópicos deste capítulo é semelhante à apresentada no experimento 01. A diferença foi a adição de um item, nomeado Análise de Disciplinas, e a remoção do item Os Produtos Gerados. No caso do primeiro, foi necessário em razão da necessidade de compreensão do processo de formação dos estudantes em relação a

⁹ Documento conjunto assinado pelos Ministros da Educação de 29 países europeus, reunidos na cidade italiana de Bolonha, que organiza os sistemas de ensino superior dos seus países de acordo com os princípios dela constantes.

disciplinas de projeto, tecnologia e representação gráfica. Para o segundo, a remoção foi feita em razão de não ter sido realizado concurso de ideias.

3.2.1 *Análise de Disciplinas na FA/ULisboa*

Este capítulo apresenta a análise de duas disciplinas de graduação: uma do curso de Arquitetura e outra do curso de Licenciatura em *Design* da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, uma das instituições envolvidas no convênio de cotutela doutoral a que esta tese está vinculada. Essas atividades de acompanhamento *in loco* de disciplinas relacionadas às temáticas da tese foram previstas no Termo de Compromisso do referido convênio. Não foi realizado estudo similar na UFRN, a outra parceira do acordo de cotutela, assim como feito nos experimentos de projeto, devido à inexistência de disciplina que contemplasse abordagem paramétrica no currículo da graduação em Arquitetura. Houve dificuldade na aplicação da análise de disciplinas em outras instituições brasileiras, uma vez que poucas delas aplicam a abordagem paramétrica na formação de arquitetos e *designers*, e em função de dificuldades de ordem logística e de fomento financeiro para realização de acompanhamento direto.

As experiências didáticas acompanhadas em Lisboa auxiliarão na formulação de diretrizes metodológicas. Compreender a implementação da modelagem paramétrica através dos casos aqui estudados, no âmbito do ensino, será importante para entender como a ferramenta pode interferir na formação dos futuros projetistas, sobretudo no que diz respeito às relações existentes entre o modelo paramétrico e as restrições construtivas. Adicionalmente, ajudará na futura implantação de disciplinas correlatas em IES nacionais, em especial na UFRN.

As disciplinas, ou unidades curriculares analisadas, foram Modelação Geométrica e Generativa, do curso de Arquitetura, e Modelação Paramétrica e Prototipagem Digital em *Design*, do curso de licenciatura em *Design*. Ambas foram ministradas pelo Professor Doutor Pedro Miguel Gomes Januário, ofertadas entre setembro e dezembro do ano de 2019, no semestre letivo 2019-2020, e acompanhadas presencialmente pelo pesquisador. As análises foram guiadas a partir de três propósitos principais:

- 1) Descrever o ambiente físico em que as aulas acontecem;
- 2) Investigar a metodologia de ensino da modelagem paramétrica aplicada em dois cursos de graduação distintos;
- 3) Entender como disciplinas das áreas científicas de projeto, representação gráfica e tecnologia se relacionam no currículo durante a formação do projetista em uma instituição de ensino superior estrangeira.

Os principais ambientes físicos da FA/ULisboa destinados à produção dos trabalhos contemplam salas de aula, laboratórios de informática, Laboratório de Prototipagem Rápida (LPR), Espaço 24 e a Oficina. Dentre os espaços majoritariamente utilizados para a produção de protótipos estão os três últimos. O LPR (Figura 112) é um espaço de prestação de serviços a estudantes e terceiros, que conta com processos de prototipagem digital utilizando duas impressoras 3D, uma fresadora CNC e duas cortadoras a laser. Os interessados enviam seus arquivos para o responsável pelo espaço, que entrega os protótipos em prazo determinado. Desse modo, não há interação direta dos projetistas com os equipamentos.

Figura 112 – Laboratório de Prototipagem Rápida (LPR).



Fonte: Acervo do autor.

O Espaço 24 (Figura 114) é um ambiente amplo e de alta integração entre os estudantes, aberto 24 horas por dia, onde são produzidos e armazenados diversos protótipos. As mesas possuem superfície de aço inox, resistentes a corte de lâminas perfurantes, comumente utilizadas durante a produção dos trabalhos. Não existe, porém, equipamentos nem máquinas nessa área. A Oficina (Figura 114) é um laboratório destinado à exploração de materiais como a cerâmica, madeira e metal. Por isso, possui máquinas industriais, que ficam isoladamente posicionadas no ambiente, separadas por paredes. Esses equipamentos exigem maior treinamento e técnica pelos estudantes, sempre

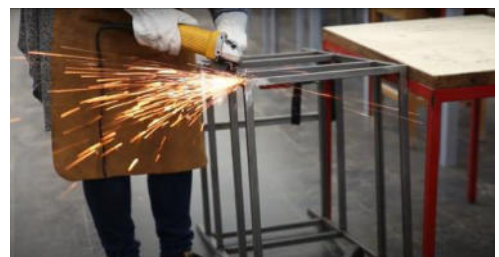
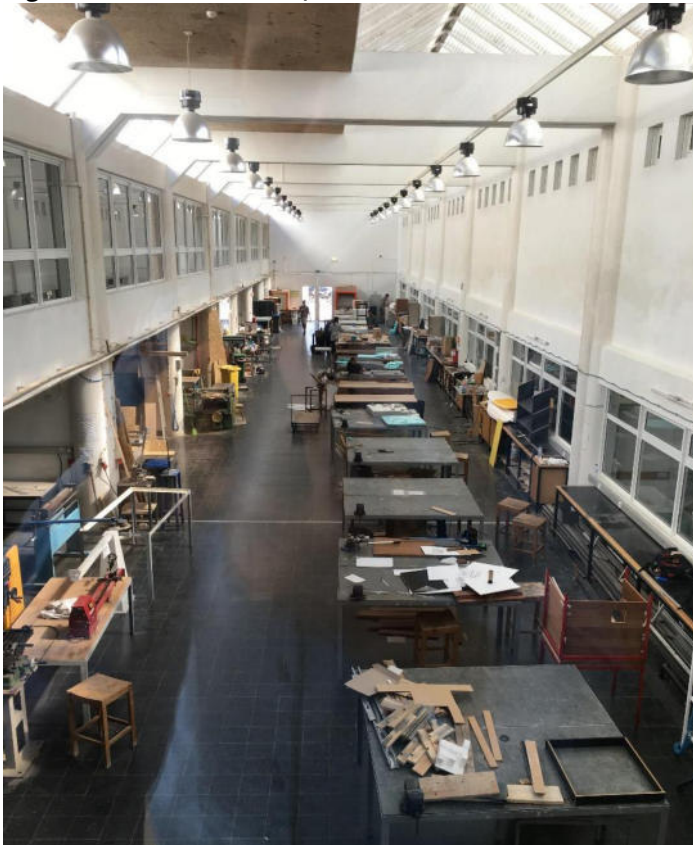
necessitando de instrução por bolsistas responsáveis. São ladeados por diversas mesas de trabalho, onde é possível realizar processos de montagem, colagem e fundição.

Figura 113 – Espaço 24 da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa.



Fonte: FA.Ulisboa (2017).

Figura 114 – Oficina da FA/Ulisboa.



Fonte: FA.Ulisboa (2017).

A nomenclatura das áreas científicas aqui mencionadas pouco muda nas escolas de arquitetura brasileiras. No âmbito da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, recebem os seguintes nomes, respectivamente: Arquitetura ou *Design*, a depender do curso

em que são aplicadas; Desenho, Geometria e Computação (DGC); e Tecnologias da Arquitetura, do Urbanismo e do *Design* (TAUD).

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do conteúdo deste capítulo envolveu um levantamento da estrutura curricular de cada um dos cursos, seguido da análise das fichas curriculares das disciplinas das três áreas científicas, aqui consideradas como mais significativas para projetos paramétricos.

No caso concreto das duas disciplinas analisadas foi possível verificar que condições a estrutura curricular vigente traz para os estudantes dos cursos de Arquitetura e *Design*, buscando entender a bagagem prévia dos estudantes em projeto, ferramentas computacionais e tecnologias construtivas. Romcy (2017, pp.248-249) defende que a abordagem paramétrica no ensino também deve incluir a área de teoria e história. Entretanto, apesar de ser extremamente valiosa para a criação de repertório e visão crítica, necessários aos futuros projetistas, não foram consideradas nesta análise. A razão para a não inclusão desta área se deve ao alinhamento desta investigação aos eixos estruturantes do projeto computacional e tecnologia, visto que os focos desta tese são o projeto paramétrico e a construtibilidade.

Foram elencadas, como unidades curriculares das áreas científicas de Arquitetura e *Design*, aquelas relacionadas diretamente às atividades práticas de concepção de objetos arquitetônicos. Para a área de Geometria, Desenho e Computação, todas as disciplinas foram incluídas. Já para a área científica de TAUD, consideraram-se apenas as unidades curriculares relacionadas às técnicas e materiais construtivos, excluindo da lista as disciplinas de conforto ambiental e eficiência energética.

A reconhecida dificuldade de implementação da modelagem paramétrica no ensino fez com que Romcy (2017, p.258) indicasse um conjunto de estratégias possíveis para o processo de implementação do tema no ensino de projeto. Uma delas é o desenvolvimento de algoritmos com o intuito de reproduzir objetos existentes. Isso possibilita, segundo a autora, a dedução da lógica compositiva e a criação dos possíveis parâmetros que podem ser controlados pelo usuário. O professor das disciplinas analisadas tomou partido dessa estratégia, em alinhamento com o que defende a autora.

É importante destacar que esta tese não tem a pretensão de sugerir alterações curriculares, nem tampouco de indicar condições favoráveis para a criação de um novo currículo, a exemplo do que propôs Romcy (2017, p.258).

Serão expostos os exercícios aplicados na capacitação dos estudantes na ferramenta, assim como alguns dos trabalhos finais do curso de *Design*. Uma segunda turma da disciplina Modelação Geométrica e Generativa foi analisada. Nela foi concebido um pequeno projeto e os resultados dos processos e produtos desenvolvidos foram apresentados no capítulo anterior, como experimento 02 da tese.

3.2.1.1 MGG (Curso de Arquitetura)

Diversas turmas desta unidade curricular (Modelação Geométrica e Generativa - MGG) são ofertadas semestralmente e uma delas foi escolhida para ser acompanhada e analisada, no semestre letivo 2019/2020. Vinculada à área de Desenho, Geometria e Computação, apresenta ementa conforme detalhado na ficha da unidade curricular (Anexo II). Possui três horas de contato semanais, que acontecem em um único dia da semana, perfazendo um total de 42 horas de contato entre professor e estudantes. Por ter sido uma unidade curricular ofertada em língua portuguesa, teve estudantes predominantemente portugueses e brasileiros.

O ambiente de trabalho em que as aulas ocorreram foi um dos laboratórios de informática da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa. O cômodo possui formato quadrado, onde se distribuem quadro, projetor e mesas contínuas, que deixam livre um corredor central. Alguns poucos computadores de mesa são disponibilizados, sendo que a grande maioria dos estudantes traz seus próprios *laptops*. Apesar da boa qualidade arquitetônica e de mobiliário disponível no espaço, a quantidade de espectadores superava os espaços disponíveis nas mesas e, por diversas ocasiões, era necessário que alguns poucos estudantes acompanhassem as aulas apenas em cadeiras, sem apoiar seus equipamentos nas mesas.

A estrutura curricular do curso de Arquitetura da Universidade de Lisboa é organizada conforme o convênio de Bolonha, conforme já mencionado no item 4.2 desta tese. A unidade curricular de Modelação Geométrica e Generativa (MGG) aparece no 7º

semestre, ou no primeiro semestre do mestrado integrado em Arquitetura. Até chegar neste semestre, os estudantes já passaram por cinco unidades curriculares da área científica de Arquitetura (Projeto) e por oito de Tecnologias da Arquitetura, do Urbanismo e do *Design*. Ainda no mesmo semestre que a unidade curricular alvo desta análise estão as unidades Laboratório de Projeto IV, Inovação Tecnológica e Novos Materiais e Estruturas II (Figura 115).

Figura 115 – Estrutura curricular do Curso de Arquitetura da FA/ULisboa, com destaque para as áreas de projeto, representação gráfica e tecnologia.

ÁREA CIENTÍFICA:	Arquitetura (Projeto)	Desenho, Geometria e Computação (Representação gráfica)	Tecnologias da Arquitetura, do Urbanismo e do Design
SEMESTRES DO Tronco comum / formação comum	1º	Ø	• Complementos de Matemática e Estatística;
	2º	• Laboratório de Arquitetura II; • Desenho Arquitetónico I; ▼ • Geometria Descritiva e Conceptual I; ▼	• Materiais;
	3º	• Laboratório de Arquitetura III; • Desenho Arquitetónico II; ▼ • Sistemas de Representação Digital em Arquitetura; ▲ (Noções de Modelação geométrica, BIM e Modelação Paramétrica)	• Edificações I – Elementos de Suporte;
	4º	• Laboratório de projeto I; • Desenho na Cidade; ►	• Edificações II – Revestimentos e Materiais; • Física das construções;
	5º	• Laboratório de projeto II; Ø	• Edificações III – Redes e Instalações técnicas; • Estática;
	6º	• Laboratório de projeto III; • Modelação e Visualização Tridimensional em Arquitetura; ▲ (Modelação Paramétrica)	• Estruturas I;
SEMESTRES DO Mestrado Integrado	7º	• Laboratório de projeto IV; • Modelação Geométrica e Generativa; ▲	• Inovação Tecnológica e Novos Materiais; • Estruturas II;
	8º	• Laboratório de projeto V; Ø	• Tecnologias da Reabilitação e conservação;
	9º	• Laboratório de projeto VI; Ø	• Edificações IV/apoio ao projeto; • Sistemas estruturais e Construtivos;
	10º	• Projeto Final de Mestrado; Ø	Ø

Legenda: Ø – disciplina inexistente; Uso de Recurso Computacional de Projeto (RCP): ▲ (Sim); ▼ (Não); ► (Indefinido)

Fonte: Adaptado a partir da ficha da unidade curricular Modelação Geométrica e Generativa (Anexo II).

A integração de recursos computacionais de projeto ocorre a partir do terceiro semestre. Nele já são introduzidas noções relativas às modelações geométrica e generativa, mas de modo complementar, como indica a ficha de unidade curricular do curso. Por dificuldades diversas de compatibilidade de conteúdo e horários, a disciplina MGG não se integrou às das áreas de Projeto e Tecnologia.

O acompanhamento da disciplina mostrou que a maioria dos estudantes possuía condições de acompanhar as aulas, apesar de exigir bastante dedicação e habilidade. Isso apontou que haveria potencial de aplicação da ferramenta paramétrica integradamente a

outras disciplinas, especialmente envolvendo concepção de objetos arquitetônicos e estudo de tecnologias construtivas inovadoras.

De acordo com a ficha da unidade curricular analisada, os objetivos a serem alcançados pelos estudantes foram:

1. Abordar a geometria como factor de optimização da relação entre as propriedades dos materiais, as configurações dos sistemas construtivos e os processos de fabricação de base digital em Arquitectura;
2. Definir critérios de classificação das estruturas geométricas (linhas, superfícies, sólidos);
3. Estudar as estruturas geométricas em função dos parâmetros que permitem a sua definição e manipulação;
4. Estudar vários grupos de transformações geométricas compreendendo os invariantes de cada um;
5. Efectuar uma abordagem algorítmica a problemas específicos de índole projectual

(Ver Anexo II).

Para alcançar os objetivos, a distribuição das atividades foi dividida em duas etapas. A primeira, com exercícios em que os estudantes tinham que reproduzir modelações transmitidas pelo professor via página da *web* e presencialmente em laboratório. Esses exercícios tinham de ser desenvolvidos durante e após as aulas, para que em seguida os estudantes montassem *portfolios* contendo capturas de tela com o processo de modelação usado para cada uma das tarefas. Na segunda etapa, os estudantes tiveram que se agrupar para desenvolver um trabalho maior, indo da escala da cidade à do edifício. A segunda fase, apesar de induzir os alunos a um trabalho de envolvimento colaborativo, não possuiu atividades de concepção de objetos arquitetônicos. Restringiu-se ao levantamento territorial, urbano e arquitetônico, de diferentes escalas, aplicando as modelações geométrica e generativa (ou paramétrica) como instrumentos essenciais à sua operacionalização. Os recursos utilizados foram o *software Rhinoceros* e o seu *plug-in Grasshopper*.

Para a primeira etapa avaliativa, foi solicitada a execução de 14 exercícios de modelação geométrica e sete de modelação generativa, totalizando 21. O primeiro conjunto de exercícios foi destinado à compreensão de princípios básicos da modelação genérica e generativa através da observação de objetos simples e desenhos manuais (Figura 116), para somente a partir deles iniciar a modelação computacional.

Em seguida, foram realizadas modelações de cefalópodes, assim como descrito na etapa de capacitação do experimento de projeto 02. No final, foram executadas modelações paramétricas de objetos simples, até outras mais complexas, que já serviriam para a aplicação no trabalho final.

Os primeiros exercícios de modelação generativa iniciaram com aplicações de baixo nível de complexidade. Dentre elas, foram modelados um bangalô, uma coluna arquitetônica e uma casa. Nesses primeiros exercícios, foi dada ênfase ao processo de escolha de intervalos dimensionais, de modo que o produto modelado tivesse comportamento paramétrico e pudesse oferecer alternativas geométricas ao estudante. Exemplos dessas aplicações foram descritos no item 4.2, que trata do experimento 02.

Figura 116 – Exercícios de identificação princípios geradores de geometrias a serem concebidas nas ferramentas de modelação geométrica e generativa.



Fonte: Estudantes matriculados na unidade curricular Modelação Geométrica e Generativa.

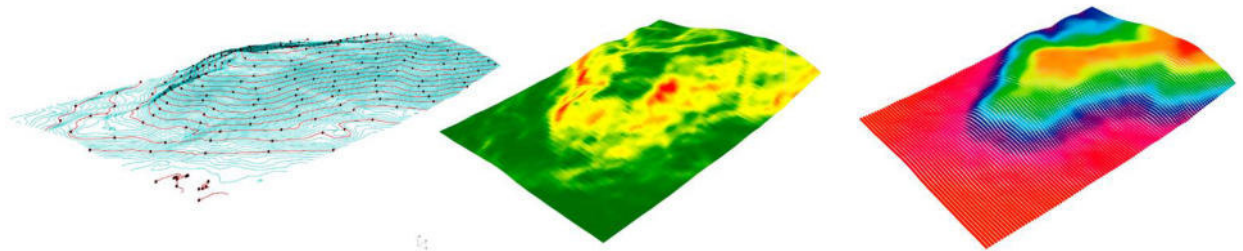
Ao ganhar experiência com os primeiros códigos desenvolvidos, os estudantes foram instigados a criar códigos que pudessem realizar análises de diagnóstico urbano. Para isso, criaram modelos paramétricos capazes de fornecer planialtimetria, inclinações e orientação solar (Figura 117).

Os estudos do terreno foram seguidos de simulações de densidade construída, ainda com o uso de ferramenta paramétrica. Esses foram os últimos exercícios da primeira etapa da unidade curricular. Nesses códigos, foi possível determinar como os edifícios poderiam

ser enquadrados em porções territoriais, inclusive com o controle de massa edificada e gabarito de altura (Figura 118). Foi possível, ainda, desenvolver estratégias de preparação dos modelos para uma futura prototipagem rápida, trazendo conceitos de impressão 3D do tipo FDM (*Fused Deposition Modeling*)¹⁰, incorporados ao código paramétrico.

Esses conceitos trouxeram, em certa medida, noções de materialização dos objetos criados, uma vez que possibilitaram a exploração dos seguintes aspectos básicos: relação da escala do modelo digital em função do protótipo a ser produzido; altura das camadas de impressão; dimensões máximas de impressão; e geração de suportes de impressão temporários. Apesar de esse planejamento da impressão 3D não se relacionar diretamente à construtibilidade dos elementos arquitetônicos, permite dar a noção de como a dimensão material pode ser aplicada ao modelo paramétrico, valorizando-a enquanto restrição projetual.

Figura 117 – Exercícios de composição de códigos de análise urbana.



Fonte: Material de aula do professor Pedro Januário.

Figura 118 – Exercícios de criação de massa edificada e de recorte de superfície topográfica.



Fonte: Material de aula do professor Pedro Januário.

¹⁰ A tecnologia FDM permite a impressão 3D através da deposição de filamento plástico que, ao passar por uma extrusora metálica aquecida, derrete e se deposita à plataforma de impressão.

Para a segunda etapa da unidade curricular, foi solicitado aos alunos que se agrupassem para desenvolver um trabalho de dimensões maiores. Os estudantes tiveram que escolher cidades listadas previamente pelo professor da disciplina, para desenvolver modelações geométricas e generativas de três magnitudes: territorial, urbana e arquitetônica. O trabalho tinha como objeto central realizar o levantamento de praças de toiros de Portugal (Figura 119), conhecidas no Brasil como arenas de touradas.

Figura 119 – Exemplo de praça de toiros em Portugal.

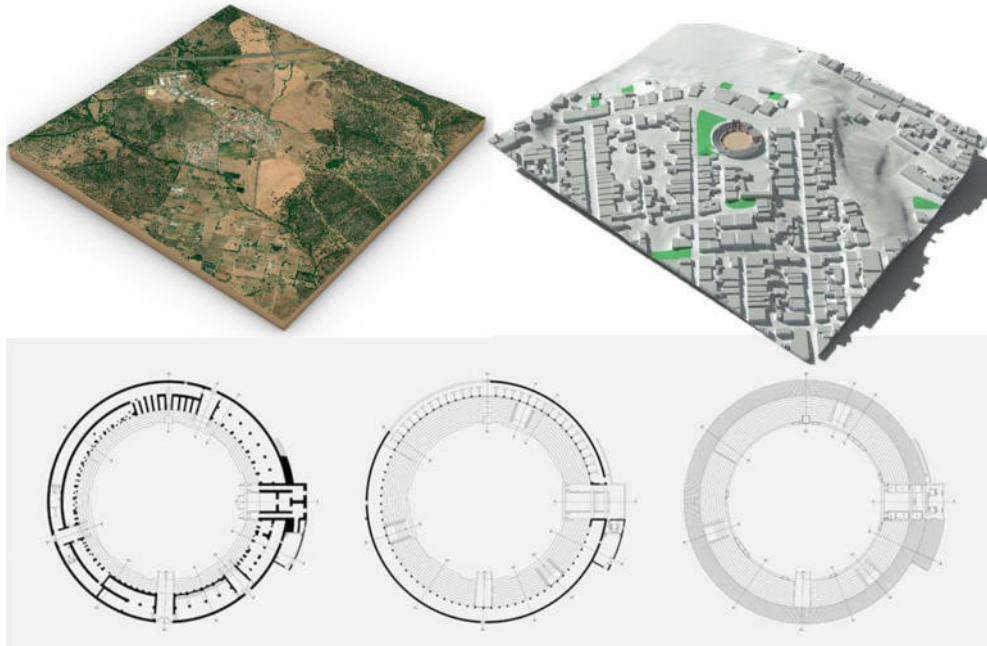


Fonte: Material de aula do professor Pedro Januário.

As praças de toiros figuraram como centro geométrico da modelação territorial, que incluía a cidade na qual o edifício estava implantado; e também da modelação urbana, incluindo o entorno imediato da edificação. O resultado foi a geração de modelos tridimensionais preparados para a prototipagem rápida e desenhos técnicos do edifício (Figura 120). Essas modelações utilizaram os códigos desenvolvidos na primeira etapa da unidade curricular, que precisaram ser reinterpretadas e contextualizadas para o problema lançado na segunda fase, que incluía cidades, bairros e edifícios distintos para cada equipe de estudantes.

O produto desenvolvido pelas equipes apresentou um mapeamento completo em diversas escalas, utilizando ferramenta paramétrica, que, junto com outros trabalhos de semestres anteriores, servirão para construir uma base de dados nacional das praças de toiros portuguesas, parte de pesquisa de pós-doutoramento do professor da disciplina.

Figura 120 – Exercício contendo os modelos territorial, urbano e do edifício.



Fonte: Material de aula do professor Pedro Januário.

Não foi possível identificar aprendizados relativos à introdução da construtibilidade durante os exercícios desenvolvidos nessa disciplina, uma vez que se tratou de um processo de levantamento e processamento de dados de edifício e cidade já existentes. Isso se explica devido à disciplina ser destinada, predominantemente, à capacitação nas ferramentas. Foi aplicada, com muita ênfase, a estratégia de reprodução de um código e a sua aplicação a um objeto, que é listada como uma das estratégias de implementação da abordagem paramétrica no ensino Romcy (2017, p.258). Entretanto, a quantidade de informações introduzidas nos diversos exercícios aplicados deu aos estudantes a possibilidade de aplicação futura da ferramenta, inclusive para atividades de concepção de objetos arquitetônicos.

Quanto à natureza da interação entre os estudantes durante o desenvolvimento dos trabalhos em grupo, estes fizeram uma divisão clara de tarefas entre si. Cada um ficou responsável pela produção de determinados produtos, indicando uma forte característica de trabalho realizado em ambiente quase que exclusivo de cooperação, com raríssimos momentos de colaboração, nos moldes do que define Kvan (2000, p. 413). Por se tratar de trabalho em que não houve concepção de objetos arquitetônicos, a categoria meios de concepção não pôde ser aplicada aqui.

3.2.1.2 MPPDD (*Curso de Design*)

A disciplina Modelação Paramétrica e Prototipagem Digital em *Design* (MPPDD) é ofertada semestralmente aos alunos da Licenciatura em *Design*, tendo sido acompanhada e analisada a oferta do semestre letivo 2019/2020. Assim como a unidade curricular analisada no item anterior, está vinculada à área de Desenho, Geometria e Computação. A ficha da unidade curricular aponta que a periodicidade de encontros é de três horas semanais, em um único encontro, totalizando 42 horas de contato direto dos estudantes com o professor. Tal qual a disciplina anteriormente analisada, teve estudantes predominantemente portugueses e brasileiros, por ser ofertada na Língua Portuguesa.

O objetivo principal da disciplina foi “... explorar o potencial criativo e conceptual da integração da Biomimética, da Morfogénese Digital, da Prototipagem Digital e do Desenho Paramétrico no Projeto” (Anexo III). Os objetivos secundários lançados foram:

- Dar a conhecer os diferentes processos de prototipagem digital, as materialidades associadas e as suas características físicas e potencial estético e conceptual aplicado ao *Design* de produtos;
- Integrar a Biomimética como elemento inspirador a nível conceptual e como repositório de soluções projetuais;
- Potenciar e desenvolver a capacidade de desconstrução e abstração geométrica da natureza;
- Introduzir e estimular a integração do Desenho Paramétrico nos processos generativos (Morfogénese Digital) de superfícies complexas a prototipar;
- Transportar os saberes tradicionais para o universo digital a fim de promover a inovação e o valor acrescento

(Ver Anexo III)

O local onde as aulas foram ministradas é o mesmo laboratório das disciplinas de Modelação Geométrica e Generativa, conforme descrição anterior. Essa disciplina também contou com um alto número de estudantes matriculados, gerando superlotação do ambiente durante as aulas e dificultando o desempenho de alguns estudantes que ficaram trabalhando apenas sentados em cadeiras, sem o apoio da mesa.

O curso de licenciatura em *Design* é estruturado, assim como o de Arquitetura, seguindo os preceitos do acordo de Bolonha. A unidade curricular alvo desta análise é ofertada no quinto semestre do curso, quando os estudantes ainda estão na fase de graduação em *Design* (Figura 121). Sete disciplinas da área de projeto são ministradas até o quinto semestre de curso e apenas duas da área de tecnologia.

O primeiro semestre possui uma disciplina da área de Projeto, duas da área de Desenho, Geometria e Computação (DGC) e uma da área de Tecnologia. Nas disciplinas da área de DGC, contudo, não é indicado o uso de ferramentas computacionais de representação na Ficha Curricular.

No segundo semestre de curso há uma disciplina de projeto (*design*), não havendo correspondência de disciplina da área de tecnologia. Na área de DGC, os estudantes têm acesso, através da unidade curricular “Sistemas de Representação Digital em *Design*”, a programas como *Rhinoceros* e o seu *plug-in Grasshopper*.

A partir do terceiro semestre, todas as disciplinas da área de DGC contemplam ferramentas específicas ou processos de representação computacionais. Talvez em função dessa introdução precoce ao ambiente computacional, a adaptação dos estudantes à modelação paramétrica, na disciplina MPPDD presente no quinto semestre, tenha sido rápida (pelo menos no semestre em que foi acompanhada). Dessa maneira, aqueles que notadamente se dedicaram ao seu aprendizado adquiriram habilidades significativas em poucas semanas.

No semestre em que foi ofertada a unidade curricular analisada, ocorreram em paralelo duas unidades curriculares de projeto e uma de tecnologia. Ainda que estas sejam supostamente alinhadas à primeira, não foi realizada nenhuma atividade integrada, também devido à falta de confluência de conteúdo.

A metodologia da disciplina também foi dividida em exercícios que podem ser marcados em duas etapas, assim como a disciplina MGG. Contudo, os exercícios desta disciplina não se aplicaram a contextos arquitetônicos, focando em produtos ligados à formação em *Design*. Os exercícios da primeira etapa já introduziram a modelação geométrica dos mesmos cefalópodes desenvolvidos pelos estudantes da unidade curricular MGG. Em seguida, foi solicitada a modelação geométrica de um peixe, com a aplicação de

escamas, para o desenvolvimento de habilidades de aderência de elementos primários a superfícies de alta complexidade geométrica (Figura 122).

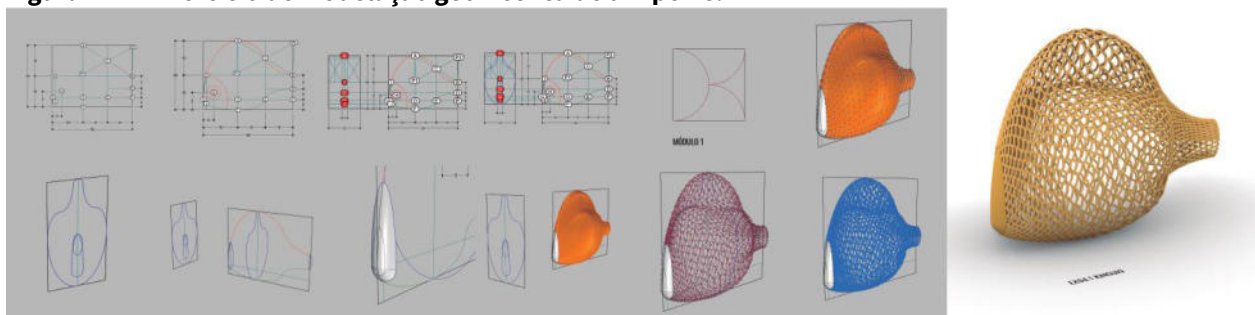
Figura 121 – Estrutura curricular do Curso de Licenciatura em Design da FA/ULisboa, com destaque para as áreas de projeto, representação gráfica e tecnologia.

ÁREA CIENTÍFICA:	Design (Projeto)	Desenho, Geometria e Computação (Representação gráfica)	Tecnologias da Arquitetura, do Urbanismo e do Design
SEMESTRES DO Tronco comum / formação comum	1º	• Design I;	• Desenho I; ▼ • Geometria Descritiva e Conceptual;
	2º	• Design II;	• Desenho II; ▼ • Sistemas de Representação Digital em Design; ▲ (Modelação geométrica)
	3º	• Design III;	• Desenho III; ►
	4º	• Ergonomia I;	
	5º	• Design Gráfico II;	• Tecnologias do Design I;
	6º	• Design IV;	• Desenho IV; ▲ (RCP Genérico)
SEMESTRES DO Mestrado Integrado	7º	• Design Gráfico III;	• Modelação Paramétrica e Prototipagem Digital em Design ▲ (Modelação Paramétrica)
	8º	• Design V;	• Tecnologias do Design II;
	9º	• Design Gráfico IV;	• Tecnologias do Design III;
	10º	• Projeto de produto;	• Engenharia do produto e sistemas de produção I;
	11º	• Sustentabilidade do produto e serviços;	• Materiais e prototipagem;
SEMESTRES DO Mestrado Integrado	12º	• Projeto de produto e serviços I;	• Engenharia do produto e sistemas de produção II;
	13º	• Metodologias de inovação em Design;	
	14º	• Empreendedorismo e Business em Design;	• Engenharia do produto e sistemas de produção III;
	15º	• Projeto de produto e serviços II;	
SEMESTRES DO Mestrado Integrado	16º	• Design de Investigação;	
	17º	• Projeto Final de Mestrado;	

Legenda: Ø – disciplina inexistente; Uso de Recurso Computacional de Projeto (RCP): ▲ (Sim); ▼ (Não); ► (Indefinido)

Fonte: Adaptado a partir da ficha da unidade curricular Modelação Paramétrica e Prototipagem Digital em Design.

Figura 122 – Exercício de modelação geométrica de um peixe.



Fonte: Estudante da disciplina MPPDD.

A primeira etapa finalizou com a execução da modelação paramétrica de um único exercício, em que os estudantes tiveram que construir o código paramétrico de uma cadeira (Figura 123). Nele, foi significativamente explorada a geração de alternativas do modelo

paramétrico, indicando como a simples manipulação de variáveis poderia gerar formas completamente distintas, a partir de um elemento aparentemente simples. Dessa maneira, foi possível instigar nos estudantes estratégias para uma geração consistente de alternativas da forma que estava a ser desenvolvida.

Figura 123 – Exercício de modelação de uma cadeira genérica.



Fonte: Estudante da disciplina MPPDD.

A segunda etapa de exercícios foi destinada à execução de um único trabalho. Os estudantes tinham que escolher, individualmente, um projeto de cadeira já disponível no mercado. A partir de seu projeto original, eles teriam que realizar a sua modelação geométrica, tal qual o modelo original e, em seguida, fazer uma releitura dela, criando variações da forma inicial. As variações do projeto original deveriam ser motivadas pela criação de parâmetros em código do *Grasshopper*, para possibilitar a geração de alternativas.

Os primeiros momentos destinados à modelação da cadeira incluíram uma exaustiva exploração das características geométricas da cadeira escolhida. Todos os estudantes tiveram que traduzir, por intermédio de desenhos à mão livre, quais eram os principais elementos definidores da forma a ser modelada. Mais adiante, isso daria condições para a criação das regras paramétricas, tão importantes para a implementação do pensamento paramétrico.

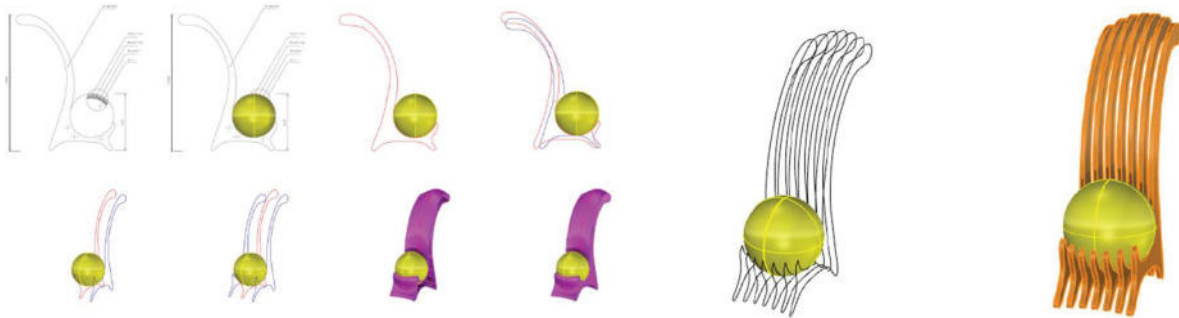
Essa tarefa os fez explorar outros aspectos, além das questões geométricas. Os induziu a pensar, por exemplo, em como a cadeira original foi executada fisicamente, para que a sua geração de alternativas pudesse ser derivada das restrições de fabricação, incluindo, também, aspectos ergonômicos inerentes ao uso do produto. O termo utilizado para definir a viabilidade de materialização dos produtos gerados será fabricação, uma vez

que a definição de construtibilidade desta tese se aplica unicamente a objetos arquitetônicos.

Foram selecionados três trabalhos que melhor exploraram as questões até aqui abordadas (geração de alternativas e estudo do processo de fabricação). O primeiro estudante, ou estudante 01, escolheu uma cadeira em que a principal restrição era a inserção de uma esfera imaginária no assento (Figura 124).

Depois de modelar geometricamente, o estudante elencou, como potenciais parâmetros a serem manipulados, o tamanho do raio da esfera imaginária do assento, o número de planos seriados e a curvatura do encosto. Isso o fez gerar uma gama de possibilidades variadas (Figura 125), gerando cadeiras individualizadas e de uso coletivo, mantendo aspectos ergonômicos e preservando a lógica de fabricação do produto.

Figura 124 – Exercício de modelação geométrica de uma cadeira pelo estudante 01.



Fonte: Estudante 01 da disciplina MPPDD.

Figura 125 – Exercício de modelação paramétrica e geração de alternativas de uma cadeira pelo estudante 01.

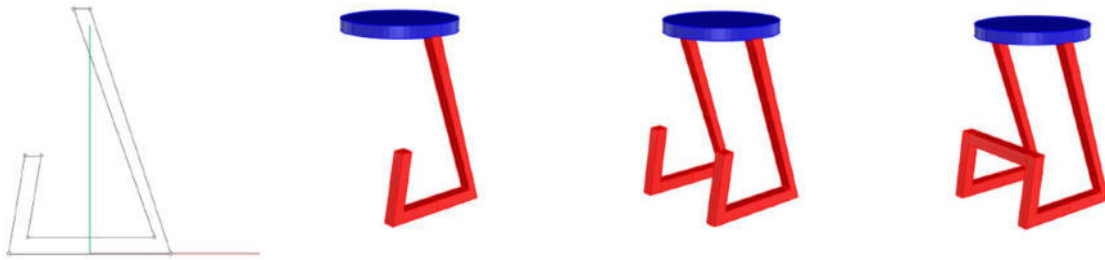


Fonte: Estudante 01 da disciplina MPPDD.

O segundo estudante, ou estudante 02, escolheu uma cadeira de forma mais simples, mas que poderia trazer maiores possibilidades, inclusive com arranjo combinatório de mais de uma cadeira. Durante a etapa de modelação geométrica (Figura 126), ele pensou em possibilidades de criação de parâmetros que permitiam a conversão

do projeto original em cadeira de alimentação de criança, com uma cadeira de adulto na frente. Ficou estabelecido um intervalo de medidas, dentro das possibilidades ergonômicas enquadradas a crianças de idades variadas, e de adultos de estaturas diversas (Figura 126). Outra variação foi a geração de um encosto independente para os pés do usuário.

Figura 126 – Exercício de modelação geométrica de uma cadeira pelo estudante 02.



Fonte: Estudante 02 da disciplina MPPDD.

O estudante delimitou, como principal lição inicial, que os ângulos das pernas da cadeira deveriam se inclinar de modo que o apoio do assento coincidisse com o centro geométrico da base, para evitar o efeito de tombamento.

O processo de fabricação previsto foi de solda em barras metálicas de perfis quadrados, com fixação simples dos assentos de madeira, tão triviais quanto o processo de fabricação da cadeira original.

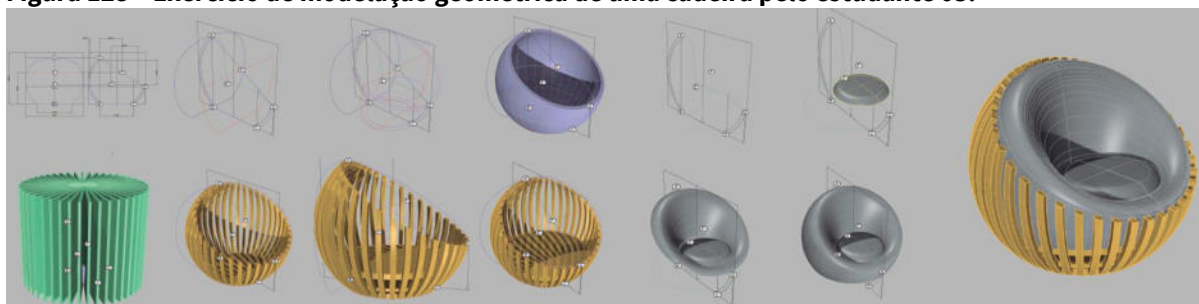
Figura 127 – Exercício de modelação paramétrica e geração de alternativas de uma cadeira pelo estudante 02.



Fonte: Estudante 02 da disciplina MPPDD.

O último trabalho selecionado, do estudante 03, foi o de uma cadeira que combinava o uso de uma esfera como elemento geométrico principal, seccionada por um plano inclinado. A superfície curvilínea era envolta por ripados curvos de madeira, dispostos em planos seriados, rotacionados a partir do centro geométrico do assento (Figura 128). O processo de construção do modelo geométrico possibilitou a compreensão da lógica geométrica e construtiva do produto, momento em que também foram pensadas futuras possibilidades de geração de variações paramétricas.

Figura 128 – Exercício de modelação geométrica de uma cadeira pelo estudante 03.



Fonte: Estudante 03 da disciplina MPPDD.

As variações paramétricas pensadas foram todas concebidas a partir do centro geométrico da esfera que gerou o formato da cadeira, assim como do plano inclinado que a corta. Essa operação de corte da esfera fez criar o assento, o encosto e os braços (Figura 129). A sutileza das variações criadas pelo estudante 03 foi altamente condicionada pelas possibilidades de fabricação, por aspectos ergonômicos e pela natureza do formato original.

Figura 129 – Exercício de modelação paramétrica e geração de alternativas de uma cadeira pelo estudante 03.



Fonte: Estudante 03 da disciplina MPPDD.

Foi estabelecido um intervalo angular para o corte do plano inclinado, que aumentaria ou diminuiria o encosto; os ripados poderiam ter espessuras próprias e espaçamentos diferentes; e poderiam também variar em quantidade.

3.2.1.3 Considerações sobre a análise de disciplinas

Compreender a etapa de capacitação revelou importantes aspectos que podem ser significativos para futuras etapas de exercício do projeto arquitetônico, sobretudo em momentos de incorporação de regras ao modelo paramétrico.

A análise de disciplinas terá também rebatimento direto na atuação acadêmica do autor desta tese, que é professor do quadro efetivo do Departamento de Arquitetura da UFRN. Os estudos podem embasar a oferta de futuras disciplinas de projeto paramétrico, preferencialmente incluindo a multidisciplinaridade entre as áreas científicas de projeto, representação gráfica e tecnologia, do Departamento de Arquitetura, e de disciplinas dos Departamentos da Indústria e da Engenharia Civil.

As disciplinas com ênfase em ferramentas paramétricas, ofertadas em cursos de graduação e/ou pós-graduação em *Design* e em Arquitetura, podem ter abordagens completamente distintas, a depender do enquadramento metodológico trazido pelo docente responsável, do espaço físico disponível e do aparato tecnológico à disposição do professor e dos estudantes. Assumindo que isso pode fazer com que haja diferentes maneiras de incluir essa ferramenta no ensino de projeto, o desenvolvimento deste capítulo não tem a pretensão de induzir um método para disciplinas de cursos de graduação, nem tampouco alterar a sua posição em estrutura curricular existente. O principal foco é extrair as principais lições tiradas por duas unidades curriculares que são aplicadas há alguns semestres, já consolidadas em seus cursos.

O dimensionamento dos exercícios da disciplina MPPDD, com menor carga de atividades, proporcionou maior tempo de reflexão para os estudantes. Esse tempo pôde ser aplicado à etapa de concepção de alternativas paramétricas, para que fosse mais bem desenvolvida.

Apesar de não ser o propósito deste capítulo, foi possível realizar o enquadramento, mesmo que parcial, de algumas categorias de análise propostas para esta tese. Das duas

disciplinas analisadas, nenhuma teve rebatimento direto em atividades de concepção de objetos arquitetônicos. Em sua primeira etapa, a disciplina MGG teve a aplicação de treinamento por meio de inúmeros exercícios. Essa grande quantidade de códigos desenvolvidos por eles possibilitou a realização dos estudos da segunda etapa, fazendo-os refletir acerca da criação de modelos paramétricos de aplicação em situações diversas. Os aspectos que estruturam esta tese, entretanto, não puderam ser diretamente observados, como já era de se esperar, visto que os propósitos que motivaram a análise de disciplinas, como já descrito no início do capítulo, foram outros.

Apesar da existência de ambientes e equipamentos ao alcance dos estudantes para a produção de protótipos, nenhum dos trabalhos foi materializado, nem mesmo em escala reduzida. Uma das razões que atribuímos foi a disponibilidade de funcionamento do LPR, cujo bolsheiro estava em processo de renovação de seu vínculo. Entretanto, os espaços físicos destinados à produção de protótipos confeccionados manualmente estavam disponíveis, indicando, provavelmente, a falta de interesse e/ou maturidade dos estudantes em buscar incluir a dimensão material em seus processos de projeto.

Mesmo não havendo concepção projetual arquitetônica, foi possível descrever e analisar alguns problemas de projeto da área do *Design*, em que também foi possível considerar alguns aspectos de construtibilidade. Apesar de não haver o projeto colaborativo, os estudantes trabalharam em equipe. A dinâmica do trabalho em equipe, no entanto, não exigiu colaboração entre os pares, pois foi possível gerar uma lista muito clara de tarefas a serem realizadas. Estas tarefas puderam ser divididas entre os membros de cada um dos grupos ou entre subgrupos de dois ou três estudantes. Assim, a maioria dos grupos conseguiu desenvolver seus trabalhos com os indivíduos executando as tarefas paralelamente, em cooperação Kvan (2000, p. 413), não tendo sido necessária a presença de uma liderança vertical (MÜLLER *et al.* (2018, p. 84) para guiar as equipes. Os meios de concepção utilizados restringiram-se aos computacionais, refletindo a falta de necessidade da aplicação de competências multimeios e multidomínios, por não haver concepção.

Em sua primeira etapa, a disciplina MPPDD aplicou exercícios mais resumidos, culminando com um exercício muito próximo do que seria aquele feito na segunda e última etapa da unidade curricular. Apesar de não ter sido aplicada a essa segunda etapa a tarefa

de concepção, os estudantes tiveram que trabalhar, com grande ênfase, a compreensão de elementos geométricos e de fabricação. Mesmo não sendo uma atividade propriamente de criação de um novo elemento, a releitura das possibilidades formais que o modelo paramétrico poderia gerar instigou os estudantes a aplicar habilidades como raciocínio lógico, matemática e computação para compreender quesitos de projeto, como defendido por Woodbury (2010, pp.24-48).

A gama de alternativas a serem criadas deu aos estudantes maior poder reflexivo e de criatividade, uma vez que novas famílias de cadeiras deveriam ser criadas. O problema de projeto (*design*) observado com mais ênfase durante a disciplina foi pensar a lógica geométrica por trás da fabricação do produto que, em grande parte das vezes, esteve relacionada à própria construção geométrica do todo e das partes da cadeira. Como o desenvolvimento de todas as etapas de cada exercício da disciplina foi realizado individualmente, não se conseguiu listar possíveis tipos de interação entre os estudantes. Por fim, para na categoria meios de concepção, observou-se que foi de grande importância a produção de desenhos manuais, uma das estratégias defendidas por Woodbury (2010, p.35), ferramenta que permitiu o teste de hipóteses projetuais (SCHÖN, 2000, p.67). Dessa maneira, ficou mais uma vez registrada a relevância de uma aplicação variada de representações como mecanismo potencializador da compreensão de um problema de projeto, como aponta Lebahar (1999, p.44).

O desafio de implantação da ferramenta em cursos de graduação traz diferentes possibilidades de implementação, como apontado por Romcy (2017, p.257). Dessa maneira, a estratégia utilizada nas duas disciplinas viabilizou diferentes maneiras de inserção da tecnologia: uma sem exploração da variável concepção e outra iniciando uma nova concepção a partir de um objeto conhecido. No segundo caso, conduziu os estudantes à dedução da lógica compositiva dos objetos escolhidos, permitindo-lhes criar parâmetros que convergiram para diferentes resultados formais e de fabricação.

No próximo item será descrito o processo de realização do experimento 02, realizado no âmbito de uma disciplina do Mestrado integrado em arquitetura, que contou com a participação de uma turma de alunos de diversas nacionalidades.

3.2.2 Perfil dos estudantes do experimento 02

Com o intuito de selecionar estudantes/projetistas com mais experiência, foram escolhidos aqueles vinculados a uma disciplina do mestrado em arquitetura, que já tivessem passado por disciplinas de projeto, estruturas e desenho computacional.

A estrutura curricular do curso de Arquitetura da Universidade de Lisboa conta com a unidade curricular nomeada Modelação Geométrica e Generativa, no 7º semestre da formação integrada (1º semestre do mestrado integrado), em que o desenho geométrico e paramétrico é introduzido. Na ocasião em que foi realizado o levantamento de dados da pesquisa em Lisboa, no semestre 2019/2020, foram ofertadas três disciplinas em português e uma em inglês. A de idioma estrangeiro foi destinada a estudantes do programa Erasmus e Erasmus Mundus, provenientes de diversas nacionalidades. Os inscritos na disciplina em inglês foram selecionados para participarem do experimento 02.

Os oito estudantes originam-se de cinco países diferentes: França, Inglaterra, Japão, Marrocos e Polônia (Figura 130). O critério de escolha das nacionalidades não foi pré-estabelecido pelo pesquisador, sendo o resultado dos estudantes que estavam matriculados na unidade curricular.

Figura 130 – Países de origem dos participantes do experimento 02.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados geográficos do *software* Excel.

Apesar de não haver o envolvimento de engenheiros civis nas equipes colaborativas, a diversidade de conhecimento aconteceu devido à variedade cultural e de formação de

cada um deles, uma vez que são oriundos de diferentes Universidades estrangeiras. A maior parte deles esteve na Universidade de Lisboa para um intercâmbio de um semestre e retornou aos seus países de origem após a realização do semestre de estudo.

3.2.3 Metodologia da disciplina do experimento 02

A metodologia da disciplina Modelação Geométrica e Generativa foi dividida em duas fases: *capacitação* e *concepção*. O mesmo componente curricular é ofertado para estudantes de língua portuguesa, conforme o que será descrito no próximo capítulo, de análise de disciplinas.

Mas, diferentemente delas, a segunda etapa foi inserida nesse componente específico com o propósito de sediar o segundo experimento desta tese.

De acordo com a Ficha da Unidade curricular, os objetivos dessa edição foram:

1. Abordar a geometria como factor de optimização da relação entre a as propriedades dos materiais, as configurações dos sistemas construtivos e os processos de fabricação de base digital em Arquitectura.
2. Definir critérios de classificação das estruturas geométricas (linhas, superfícies, sólidos).
3. Estudar as estruturas geométricas em função dos parâmetros que permitem a sua definição e manipulação.
4. Estudar vários grupos de transformações geométricas compreendendo os invariantes de cada um.
5. Efectuar uma abordagem algorítmica a problemas específicos de índole projectual.

(Ver Anexo II)

A disciplina teve duração de 15 semanas, sendo 11 para *capacitação* e quatro para *concepção*. A primeira fase, de *capacitação*, foi destinada a dar instrução no *software Rhinoceros* e, em seguida, foi integrado o seu *plug-in Grasshopper*. Essa foi a primeira diferença para a capacitação do experimento 01 que, devido ao pouco tempo de execução, aplicou apenas exercícios com *Grasshopper*. A segunda fase destinou-se à *concepção* de um pequeno pavilhão arquitetônico, a ser projetado de acordo com o enunciado fornecido (Apêndice E).

Os 15 encontros tiveram duração de três horas cada um, realizados em sala com estrutura laboratorial – com mesas alongadas para o uso de *laptops* e outros meios de representação, como desenhos à mão livre e modelos físicos simples.

A materialização futura do edifício não foi lançada como possibilidade para os participantes do experimento 02, como feito no experimento 01, em razão de não ter surgido oportunidade para a realização de obra na região.

A cidade escolhida para implantar o projeto foi o Estoril, localizada a aproximadamente 27 km de Lisboa (Figura 131). O projeto a ser desenvolvido se trata de um pavilhão, que deveria tomar partido do uso de paletes de madeira, e resultasse de uma composição de forma complexa. Deveria funcionar como passagem coberta para pedestres e como um lugar para ficar e contemplar a paisagem. A solução a ser proposta pelas equipes colaborativas deveria cobrir parte de uma calçada interna do Jardim do Estoril.

Figura 131 – Área de intervenção do experimento 02.



Fonte: Google Maps.

Os jardins do Estoril são uma grande praça pública em frente à estação de trem da municipalidade do Estoril, e contém diversos hotéis e um grande cassino. O local atrai muitos turistas também pela sua relação com a praia, que possui diversos restaurantes, bares e um grande passeio público.

Figura 132 – Vista da área de intervenção a partir da fonte central dos Jardins do Estoril.

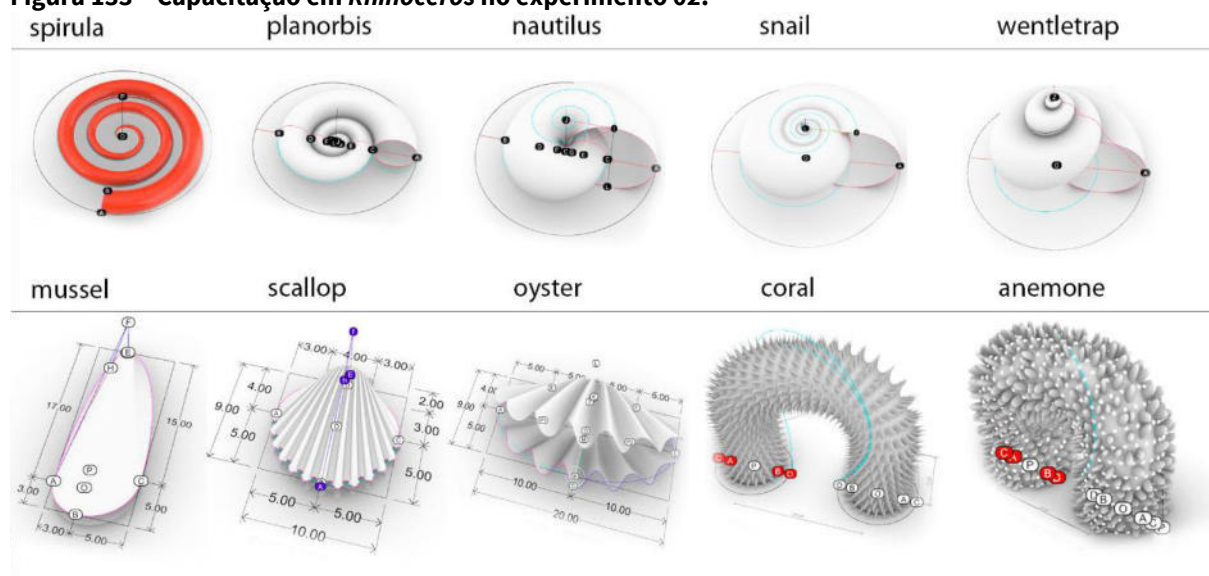


Fonte: Acervo do autor.

O local destinado à intervenção é uma parte do jardim, que costuma ter exposições temporárias de diversas naturezas. A escolha do local foi motivada por fatores como visibilidade, potencial cênico-paisagístico e integração entre a área central dos jardins e a área lateral, que faz ligação com um hotel. Na ocasião da visita realizada aos jardins do Estoril, o local exato de implantação dos futuros projetos estava ocupado por *containers* (Figura 132), indicando a sua frequente utilização por edificações temporárias.

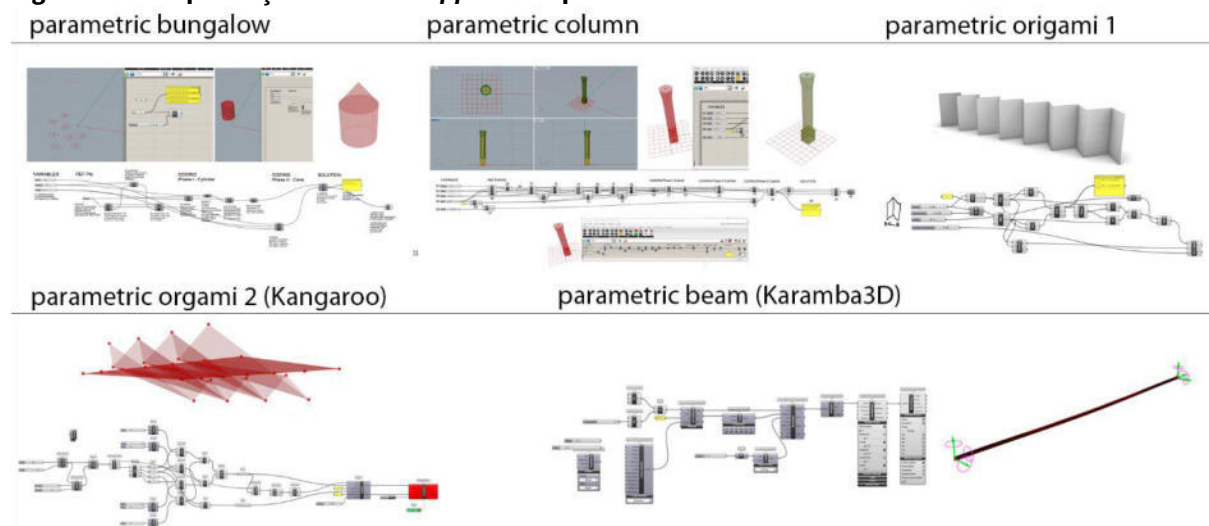
3.2.4 Capacitação dos estudantes do experimento 02

A estratégia aplicada à etapa de capacitação dos estudantes foi baseada na aplicação de exercícios de manipulação da forma, desde a mais simples até outras de maior complexidade. Os estudantes modelaram formas simples para entenderem a manipulação de superfícies e as operações matemáticas booleanas. Eles também criaram formas complexas pela exploração da morfogênese de diferentes cefalópodes como a espíricula, o planorbis, o nautilus, o caracol, o caramujo marinho, o búzio, o mexilhão, a vieira nervurada, a ostra, o coral e a anêmona (Figura 133).

Figura 133 – Capacitação em *Rhino* no experimento 02.

Fonte: Monteiro *et al.* (2020).

Na etapa seguinte, os estudantes começaram a trabalhar com o *plug-in Grasshopper* modelando geometrias paramétricas simples, para entenderem como as regras e parâmetros poderiam ser manipulados em simples soluções projetuais (Figura 134). Isso foi importante para a fase de concepção, para que fosse compreendida como funcionava a geração de alternativas de projeto na ferramenta.

Figura 134 – Capacitação em *Grasshopper* no experimento 02.

Fonte: Monteiro *et al.* (2020).

A última aula de capacitação foi voltada à aplicação de materialidade, em que os estudantes tiveram ideia do comportamento físico de determinados materiais. Esse comportamento físico foi introduzido com o uso de movimentos de origami, usando um *add-on* intitulado *Kangaroo Physics*, que simula, em modelos meramente geométricos,

algumas forças da física. A outra aplicação do comportamento físico dos materiais foi a simulação do comportamento estrutural de uma viga simples de madeira, onde foi possível entender como a peça poderia ser afetada por três variáveis estruturais básicas: suportes, cargas e seções transversais de madeira, utilizando o *add-on* intitulado *Karamba3D*.

Esses exercícios, aplicando ferramentas *add-ons* de comportamento físico dos elementos, permitiram aos estudantes uma compreensão que foi além da geração de pura geometria, possibilitando-lhes a percepção do movimento inerente às propriedades dos materiais.

3.2.5 Formação e perfil das equipes colaborativas do experimento 02

Para a fase de concepção, os estudantes foram agrupados de acordo com critérios como assiduidade, potencial de interação e habilidades nas ferramentas computacionais *Rhinoceros*, *Grasshopper*, *Kangaroo* e *Karamba3D*, baseados na observação direta da sua performance durante a etapa de capacitação.

Eles foram distribuídos em dois grupos, com quatro estudantes cada, nomeados como G1-E e G2-E e classificados como colaborativos de estudantes (CE1). O primeiro continha um estudante britânico, dois poloneses e um marroquino. O segundo, foi composto por um polonês, dois japoneses e um francês, conforme agrupamento lançado para a realização do experimento 02 (Figura 135).

Figura 135 – Quadro com agrupamento das equipes colaborativas.

Grupos	Categoria colaborativa	Identificação do estudante	Nacionalidade
G1-E	CE1	G1-E-ARQ1	Britânico
		G1-E-ARQ2	Polonês
		G1-E-ARQ3	Polonês
		G1-E-ARQ4	Marroquino
G2-E	CE1	G2-E-ARQ1	Polonês
		G2-E-ARQ2	Japonês
		G2-E-ARQ3	Japonês
		G2-E-ARQ4	Francês

A partir da identificação dos perfis e o posterior agrupamento de estudantes em equipes colaborativas, destinou-se à etapa seguinte, de concepção, que teve a aplicação das condições descritas na “Metodologia da disciplina”. A seguir, serão expostos os processos de projeto das duas equipes de estudantes, dando ênfase às quatro categorias

analíticas estruturantes desta tese: problema de projeto, construtibilidade, projeto colaborativo e meios de concepção.

3.2.6 Os processos de projeto das equipes colaborativas

Os dois grupos de estudantes iniciaram o processo de projeto delineando, conforme recomendado pelo professor da disciplina, como seria a dinâmica de relacionamento entre eles durante os momentos de concepção, considerando que alguns dos participantes se conheceram na disciplina, e a maior parte deles nunca tinha projetado colaborativamente uns com os outros.

Os processos de projeto foram acompanhados pelo pesquisador utilizando instrumentos semelhantes àqueles descritos no item 4.1.5 desta tese, a saber: 1) observação direta do pesquisador; 2) coleta de representações e relatórios produzidos pelos projetistas; e 3) aplicação de formulário eletrônico com os participantes após a realização dos experimentos. Não foi possível realizar a dinâmica de grupo focal, como no experimento 01, devido à entrega do material ter ocorrido em período no qual os estudantes estrangeiros estavam regressando aos seus países de origem.

Assim como descrito no item 4.1.5, a etapa de *concepção* foi direcionada pelo professor da disciplina que os grupos realizariam, como ações projetuais obrigatórias:

- Planejamento e gestão do tempo;
- Definição do tipo de modalidade de projeto colaborativo (concurso de ideias interno ou coconcepção);
- Estudos de referências/precedentes projetuais;
- Partido arquitetônico;
- Planejamento geral da modelagem paramétrica.

Adicionalmente, outras ações projetuais poderiam ser aplicadas ao longo do processo, mas de modo livre, a depender da percepção do problema de projeto.

As descrições dos processos de projeto dos grupos G1-E e G2-E foram observadas e relatadas a partir da consideração dos seguintes tópicos:

- Composição da equipe de profissionais;
- Planejamento de atividades;

- Definição da modalidade de concepção de projeto, quando assim houve;
- Estudos de referências projetuais;
- Definição de Conceito e Partido;
- Primeiras ideias e sua evolução;
- Planejamento da modelagem/modelação paramétrica;
- Conclusões acerca das categorias de análise (problema de projeto/construtibilidade/projeto colaborativo/meios de concepção);
- Apresentação do produto.

3.2.6.1 Grupo G1-E

Dois estudantes poloneses, um inglês e um marroquino compuseram o grupo G1-E. O estudante G1-E-ARQ1 foi o único que tinha experiência prática anterior com modelagem paramétrica e isso ajudou quando houve o primeiro contato com o problema de projeto, direcionando para possíveis soluções. Isso reforça que “usuários experientes ou habilidosos com ferramentas digitais podem reduzir tempo na geração do modelo paramétrico e dar mais foco nas atividades projetuais” Gallas *et al.* (2015). Segundo o autor, usuários novatos tendem a considerar a atividade de modelagem paramétrica como uma restrição adicional que influencia no processo de projeto.

Essa experiência anterior do estudante G1-E-ARQ1 com recursos paramétricos também se desdobrou numa disputa por liderança vertical que, de algum modo, interferiu na integração entre os projetistas. Porém, os demais estudantes entenderam mais adiante que, após cada um cooperar com um conjunto de contribuições, eles poderiam colaborar discutindo e negociando as soluções, como indicado por Kvan (2000, p. 413). Durante o processo, as lideranças horizontais começaram a surgir, dando mais espaço para a colaboração do que para a cooperação.

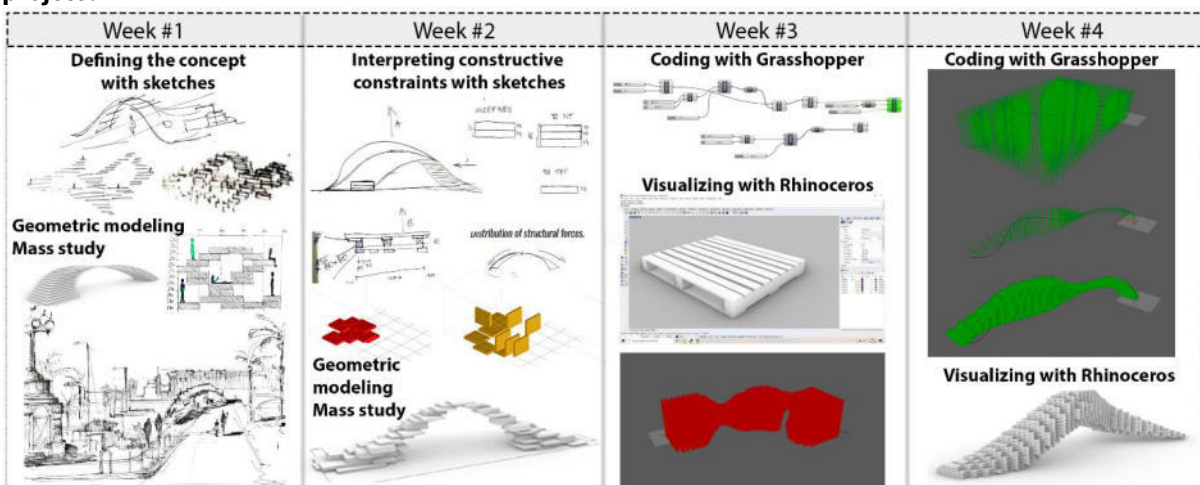
As ações projetuais mais significativas adotadas pelos estudantes foram as seguintes:

- Elaboração de cronograma projetual
- Definição de modalidade colaborativa
- Estudo de referências projetuais
- Definição de partido arquitetônico

- Estudo volumétrico
- Análise de viabilidade construtiva
- Planejamento da modelagem paramétrica
- Modelagem paramétrica
- Análise de alternativas paramétricas
- Documentação do projeto
- Renderizações

Na primeira semana, os estudantes investiram a maior parte do tempo realizando pesquisa das referências projetuais e definiram o conceito do projeto. As primeiras ideias esboçadas pelos estudantes apontaram para a criação de uma estrutura orgânica que surgiu da combinação de três tipos de módulos: paletes inteiros, metade de paletes e paletes divididos em quatro partes, formando quatro quadrados (considerando uma vista de topo). Eles discutiram como esses módulos poderiam ser distribuídos volumetricamente, especialmente refletindo acerca da incorporação das possíveis relações espaciais do código do *Grasshopper* e na criação de um nó estrutural para conectar esses módulos.

Figura 136 – Resumo das ações projetuais do grupo G1-E durante as quatro semanas do experimento de projeto.



Fonte: Monteiro *et al.* (2020).

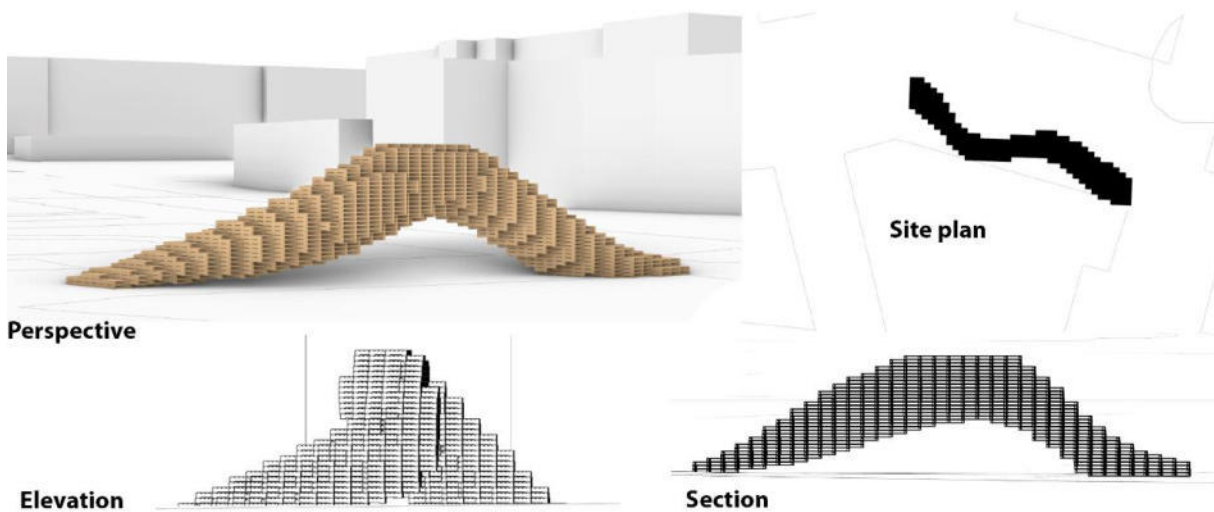
Na segunda semana, os estudantes passaram a se preocupar em resolver quatro problemas de projeto principais: o movimento das pessoas por baixo da estrutura, a forma final do projeto, os traspasses dos paletes (para criar as juntas) e a distribuição das forças estruturais ao longo de toda a construção. Os projetistas trabalharam, a partir desses dois

momentos iniciais, em cooperação. Enquanto três deles (G1-E-ARQ2, G1-E-ARQ3 e G1-E-ARQ4) trabalharam com estudos volumétricos e de detalhes, utilizando como ferramenta croquis e modelagem geométrica, o G1-E-ARQ1 encarregou-se de fazer as primeiras tentativas de iniciar um código no *Grasshopper*. Apesar disso, foi apenas na terceira semana que iniciaram um código bem planejado.

Os estudantes utilizaram uma lógica para a criação do código baseada na construção de uma curva não paramétrica dividida em pontos, controlados parametricamente pelo código (Apêndice I). Esses pontos se tornaram os centros geométricos de círculos e elipses. Essas curvas serviram de guia para a geração de uma superfície, que possuía uma nuvem de pontos em seu interior, conforme pode ser observado no resumo do processo de projeto (Figura 136). Com uma distância fixa, essa nuvem de pontos serviu de base para ancoramento dos vértices de uma caixa envolvente externa imaginária do palete.

Na quarta e última semana, o grupo G1-E teve o seu maior impasse durante a projeção: a interseção entre a nuvem de pontos e a superfície não estava combinada às dimensões corretas dos paletes, gerando uma inconsistência construtiva no processo de projeto. Isso os levou a abandonar três tipos de módulos, decidindo pela aplicação apenas do quarto de paleta no projeto final. Fazendo isso e reinterpretando o código como um todo, também foi necessário estudar a lógica algorítmica da “árvore de dados”, assim como o gerenciamento de lista de dados, para que a nuvem de pontos fosse reorganizada e o projeto pudesse ser finalizado. A percepção da construtibilidade foi priorizada desde as etapas iniciais do projeto paramétrico, contribuindo para a sua fluidez, o que confirma a hipótese lançada nesta tese.

A solução projetual foi uma superfície de forma livre preenchida por módulos de um quarto de paletes (Figura 137). Apesar das preocupações com o traspasse da estrutura para sustentar e conectar os módulos uns aos outros, o grupo não explicou como a conexão entre os paletes poderia ser resolvida e isso poderia ter algum impacto na forma final. Essa foi uma questão de construtibilidade não resolvida, relacionada ao projeto estrutural, que deveria apresentar uma solução viável antes de ir para a etapa de documentação do projeto e, em seguida, à obra.

Figura 137 – Representações finais do grupo G1-E.

Fonte: Monteiro *et al.* (2020).

Durante o desenvolvimento da atividade, o professor teve que atuar, em determinadas circunstâncias, como consultor nas ferramentas paramétricas. Essa consultoria não teve interferência em soluções nem em decisões projetuais, uma vez que se limitou apenas a mostrar caminhos possíveis para que os estudantes pudessem desenvolver soluções para o código, a partir de propostas trazidas previamente por eles. A falta de conhecimento em técnicas construtivas também foi um limitador, porém, significativamente maior do que os enfrentados pelas equipes de profissionais do experimento 01.

3.2.6.2 Grupo G2-E

Assim como o G2-E, este grupo foi composto por quatro componentes. Entre eles, estavam um polonês, dois japoneses e um francês. Nenhum deles detinha experiência no uso de ferramentas paramétricas antes da realização do experimento de projeto. Como possível consequência desse fato, como preveem Gallas *et al.* (2015), a falta de experiência na ferramenta mostrou que a atividade de modelagem tornou-se, no princípio, uma restrição adicional para os estudantes. Contudo, mais adiante, graças à experiência dos estudantes G2-E-ARQ1 e G2-E-ARQ2 em outros recursos computacionais de projeto, esse quadro pôde ser revertido.

A interação entre os estudantes aconteceu mais fluidamente do que no grupo G1-E, levando a um ambiente mais colaborativo que cooperativo Kvan (2000, p. 413). Eles adotaram um conjunto de ações projetuais, a seguir listadas:

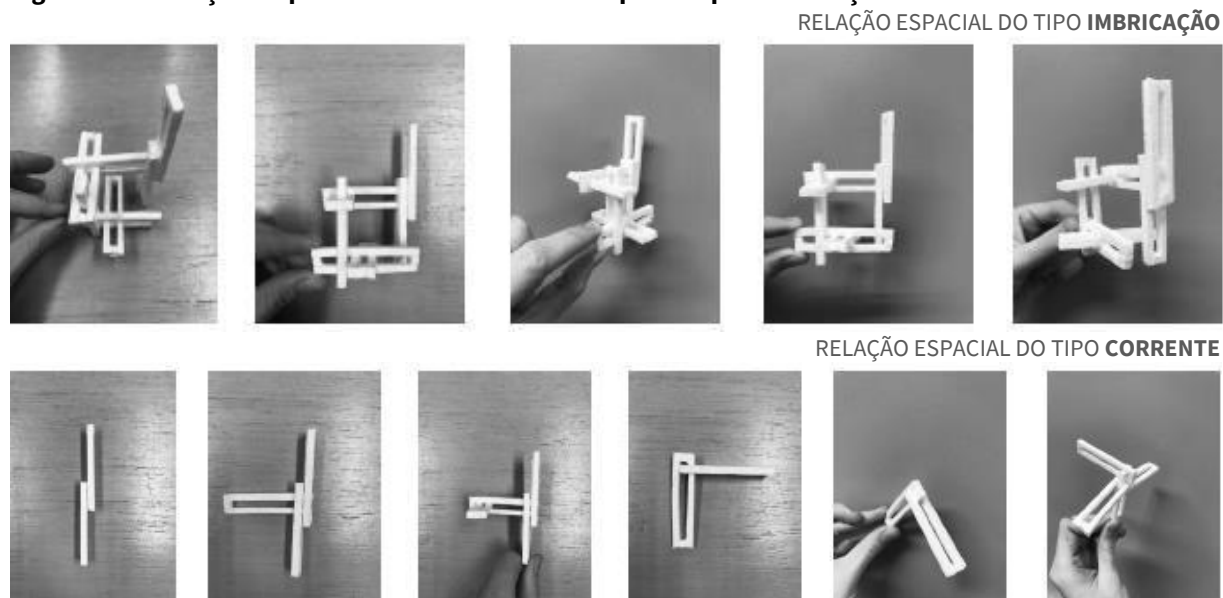
- Elaboração de cronograma projetual
- Definição de modalidade colaborativa
- Estudo de referências projetuais
- Definição de partido arquitetônico
- Estudo volumétrico
- Análise de viabilidade construtiva
- Planejamento da modelagem paramétrica
- Modelagem paramétrica
- Análise de alternativas paramétricas
- Estudo de materialidade
- Documentação do projeto
- Renderizações

Na primeira semana, os estudantes discutiram predominantemente o partido arquitetônico, que convergiu para o uso de uma fatia do palete de madeira como módulo estruturante do projeto, podendo ser multiplicado para gerar uma corrente controlada parametricamente. Isso traria o movimento tão desejado pela equipe desde as primeiras ideias, assim como a possibilidade de gerar alternativas de projeto suficientemente diversas, para auxiliá-los no processo decisório.

A segunda semana de projeto foi destinada à incorporação de tipos de movimento que interfeririam globalmente em toda a geometria, relacionando essa atividade a estudos de zoneamento. Mesmo antes de partir para a criação de um modelo paramétrico, os estudantes, não entenderam como esse movimento poderia ser viabilizado. Depois de algumas tentativas em meios de concepção como croquis e modelagem geométrica, atentaram para usar modelagem física com isopor, para tentar ter uma melhor percepção do dinamismo entre as peças (Figura 138). Dessa maneira, as competências multimeios e multidomínios Lebahar (1999, p.45) ajudaram a simular soluções que ainda estavam em

alto grau de abstração e, por meio desse novo meio de concepção, puderam conversar com a representação (SCHÖN, 2000, p.68), refletir na ação e descobrir novas possibilidades.

Figura 138 - Relações espaciais entre os módulos de paletes por imbricação.



Fonte: Grupo G2-E do experimento 02.

As semanas seguintes foram destinadas ao planejamento da modelagem paramétrica, sempre retornando aos croquis e aos modelos físicos anteriormente criados para validar como as restrições de movimento aconteceriam.

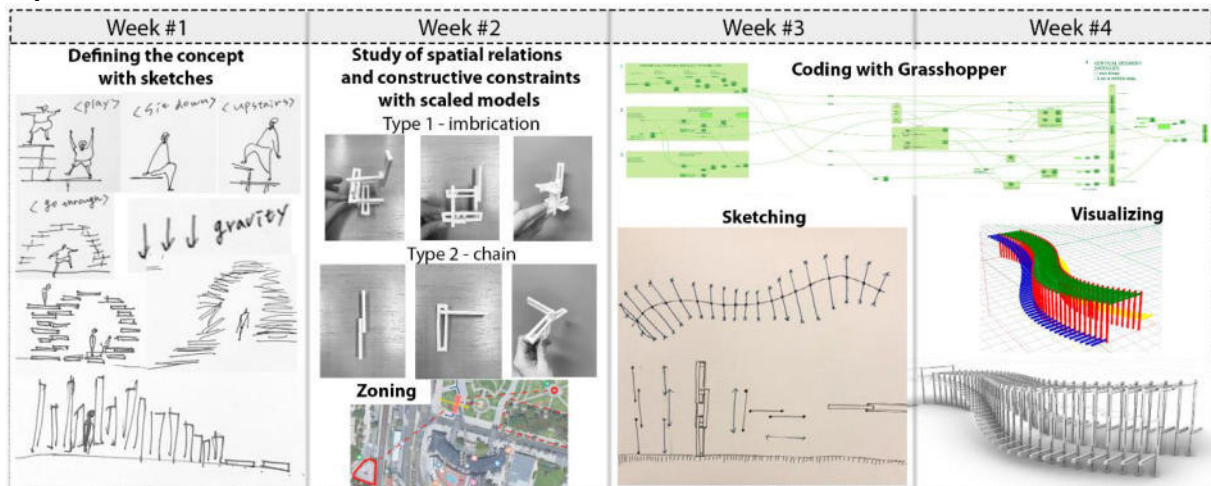
Os estudantes conceberam, então, seu pavilhão, baseados na criação de curvas planificadas no plano do solo. Essas curvas foram criadas originalmente a partir de uma sequência de pontos distribuídos linearmente como uma reta, atraídos ou repelidos por um ponto externo. Toda essa regra foi criada a partir de cálculos matemáticos em que os parâmetros relacionavam o cálculo da distância desse ponto para aos demais pontos que compunham a curva. Esse ponto de referência funcionou como um ímã e atraía o resto da geometria.

Os paletes foram decompostos para gerar um módulo que pôde ser comparado ao elo de uma corrente. Cada um desses módulos foi associado a um ponto nas curvas planificadas no solo e ganhou altura através dos encaixes do tipo imbricação ou corrente, que serão mais detalhados adiante.

Esses módulos de paletes se movimentariam para apertar ou folgar a corrente, dependendo da localização do ponto de atração. Quanto mais longe o ponto fosse da

geometria principal do projeto, a corrente se tornaria mais folgada, e o oposto aconteceria quando o ponto se aproximasse. O grupo planejou os limites desejados para esses movimentos associando modelagem física a código paramétrico (Apêndice I), respeitando as restrições das ligações, que foram observadas durante o estudo de relações espaciais entre os módulos. Isso mostrou a importância do hibridismo no processo de projeto paramétrico Gallas *et al.* (2015).

Figura 139 – Resumo das principais ações projetuais do grupo G2-E durante as quatro semanas do experimento 02.



Fonte: Monteiro *et al.* (2020).

Os estudantes tiveram dois impasses durante o processo de projeto. O primeiro ocorreu quando da definição dos primeiros conceitos do projeto. Eles não souberam como prever o efeito da curva mencionada anteriormente, especialmente as relações entre os módulos de paletes. O estudante G2-E-ARQ4 idealizou testar as conexões entre os módulos usando os modelos físicos com restos de isopor. Os estudantes definiram, a partir deste modelo, as relações espaciais como de imbricação e corrente.

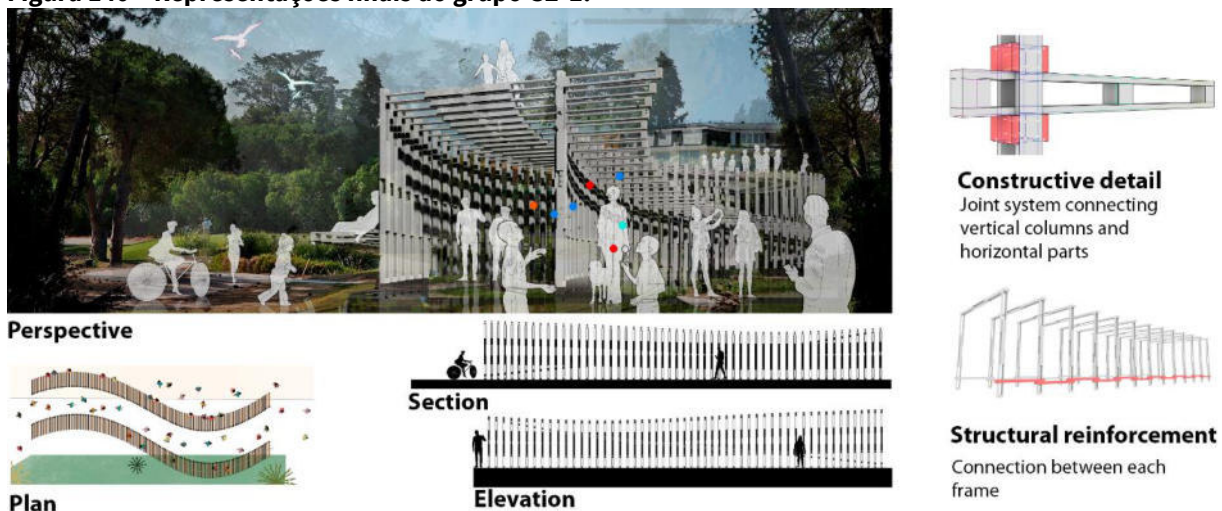
O segundo impasse ocorreu durante a fase de criação do código paramétrico. Eles tiveram que reinterpretar os movimentos observando os modelos físicos e investiram uma semana na tentativa de montar, da maneira mais leve possível, a modelagem paramétrica.

Os projetistas entregaram as representações finais do pavilhão projetado, que foi um produto composto dos segmentos de paletes arranjados conforme uma das diversas alternativas proporcionadas pelo modelo paramétrico criado. Foi apresentada solução para os problemas de ligação entre os elementos, problemáticos durante o processo de

criação da forma e que poderiam comprometer a construtibilidade do objeto arquitetônico. Até a última semana do experimento, esses elementos estavam “flutuando” no plano horizontal, sem qualquer apoio estrutural, travamento ou conexão.

A alternativa encontrada foi o resultado da melhor combinação de fatores formais, estéticos e de função, conforme declarado pelos projetistas e, sobretudo, a partir das restrições construtivas, que condicionaram radicalmente a concepção do projeto.

Figura 140 – Representações finais do grupo G2-E.



Fonte: Monteiro *et al.* (2020).

Os professores tiveram de atuar como guias em alguns raros momentos do processo de projeto. Eles interagiram com os estudantes apenas na condição de consultores na ferramenta ou como validadores de determinadas soluções construtivas propostas. Contudo, atuaram no papel apenas de provocadores, não de projetistas, criando um ambiente de prática reflexiva, como defende Schön (2000, p.47).

3.2.7 *Análise dos resultados*

Os resultados foram analisados conforme a sequência das quatro categorias analíticas da tese. Os estudantes dos dois grupos desta categoria (CE1) fizeram pesquisa aprofundada em cada passo do processo e isso refletiu nas suas ações projetuais, especialmente durante os primeiros estágios. Houve uma constante alternância entre as estratégias observadas nessas ações projetuais com o intuito de buscar soluções mais adequadas a cada interpretação dada ao problema de projeto.

As restrições construtivas, associadas aos desafios da adoção da modelagem paramétrica, fizeram surgir os principais problemas de projeto a serem considerados pelas equipes. Isso se refletiu em altos impactos ao processo e ao produto projetual. O conhecimento e as habilidades mais aprofundadas em projeto paramétrico poderiam potencializar o uso das restrições construtivas com mais eficácia, conforme defendido por Gallas *et al.* (2015).

A combinação multicultural trazida pelos estudantes de diversas nacionalidades fez surgir abordagens e interações diversas. Essa combinação resultou em uma mistura de comportamentos de cooperação e colaboração. Japoneses, inglês e poloneses demonstraram mais disciplina e foco em tarefas de cooperação, enquanto os estudantes marroquino e francês apresentaram mais postura de liderança vertical, importante para dirigir mais foco para a equipe, como descreve Pearce (2004, p.48). Isso foi importante para que os momentos de negociação e avaliação (KVAN, 2000, p. 413) acontecessem com maior fluidez. Essa combinação de diferentes perfis refletiu positivamente no processo, trazendo soluções dinâmicas durante o percurso projetual.

A alta variedade de meios de concepção analógicos (como croquis e modelos físicos, e meios digitais, paramétricos e não paramétricos) mostrou a importância da apresentação de competências multimeios e multidomínios Lebahar (1999, p.45) como mecanismo facilitador do processo de projeto.

Observando os processos de projeto do experimento 02 e relacionando-os aos resultados das quatro categorias de análise apresentadas nesta tese, foi possível concluir que os estudantes combinaram as seguintes habilidades:

- Boa sistematização de ideias para resolução do problema de projeto;
- Foco e disciplina para dedicar tempo à projeção;
- Balanceamento entre liderança vertical e horizontal, trazendo foco e direção à equipe;
- Alta habilidade em meios híbridos de representação;
- Habilidade com matemática, lógica e meios computacionais de projeto.

Os estudantes foram convidados a responder um formulário eletrônico depois do experimento 02 para comparar as suas impressões com as conclusões extraídas da observação (Apêndice F). O formulário eletrônico foi estruturado em quatro partes, coincidindo com as categorias analíticas da tese. A compilação das respostas confirmou a impressão retirada das observações e as lições retiradas do exercício projetual foram:

- As restrições projetuais que tiveram mais impacto no processo de projeto foram a formal e a construtiva;
- A ferramenta de modelagem paramétrica foi utilizada para integrar restrições construtivas, a partir do momento em que geometrias simples puderam ser substituídas por elementos estruturais mais detalhados;
- As restrições trazidas pelo material – os paletes – conduziram à geração de ideias de adaptabilidade da forma, impactando no produto;
- A colaboração permitiu um projeto mais coeso, mas também houve momentos de falta de direção sem a força condução da liderança vertical;
- O uso do hibridismo fez com que os problemas ficassem mais aparentes, ajudando na tomada de decisões.

Este experimento contribuiu para entender como estudantes de arquitetura introduzem restrições construtivas através de ações projetuais ao longo do fluxo de trabalho do processo paramétrico, trazendo à discussão como a construtibilidade pode impactar o processo de projeto paramétrico em ambiente acadêmico. Abordagens multidisciplinares no projeto colaborativo, como as desenvolvidas no *Georgia Institute of Technology*, entre outras instituições de ensino superior (NICKNAM *et al.*, 2013), são valiosas para perceber a relação de diferentes departamentos de ensino e da indústria em contextos de projetos paramétricos.

Porém, mesmo sem a presença do ambiente de multidisciplinaridade que defende o manifesto do Novo Estruturalismo Oxman; Oxman (2010), o ato de fornecer restrições de projeto mais próximas à realidade, como disponibilizar materiais e possíveis conexões, além de incentivar atividades colaborativas, pode trazer processos e resultados mais próximos da realidade profissional.

Quando comparadas as restrições de projeto apresentadas no experimento 02 ao modelo tridimensional de Lawson (2011, p.106) é possível identificar que, durante o processo de projeto, a primeira restrição foi a formal. Restrições construtivas, nomeadas como práticas, começaram a aparecer quando os estudantes tentaram migrar o seu projeto para o meio digital. O uso constante de meios de concepção híbridos ajudou a entender o papel dessas restrições. A maior dificuldade dos estudantes foi trazer soluções construtivas para problemas específicos, claramente devido à falta de experiência prática.

Algumas das ações projetuais decisivas do experimento 02 estão listadas a seguir:

- Definição do Partido arquitetônico;
- Estudo volumétrico;
- Análise de viabilidade construtiva;
- Estudo de materialidade;
- Planejamento da modelagem paramétrica.

Algumas dessas ações coincidem com estratégias observadas em anos de disciplinas e oficinas de projeto paramétrico observadas por Woodbury (2010, pp.24-48). Essa lista de ações contribuirá para a montagem das diretrizes metodológicas desta tese.

3.3 Considerações sobre o capítulo

Para a análise dos resultados, foi feito o mapeamento das principais ações projetuais adotadas ao longo das quatro semanas dos experimentos 01 e 02, por cada uma das oito equipes envolvidas (Quadro 12). Complementarmente, foi feita a identificação temporal da ordem dessas ações, elegendo as quatro principais ações projetuais semanais de cada grupo. A junção dessas duas maneiras de analisar os dados permitiu identificar como construtibilidade e modelagem/modelação paramétrica, ou parametrização, dialogaram ao longo dos processos de projeto. Apesar de os oito experimentos estarem presentes no mesmo estudo, as equipes envolvidas foram separadas em três categorias, uma vez que a diferença na composição dos grupos não permite a comparação direta dos resultados.

O tipo de integração entre arquitetura e fabricação presente nos experimentos assemelhou-se com o que é definido como solução *in-house*, se considerada a classificação

de Celani e Lenz (2014), já que trazer empresas e/ou consultores não se encaixava orçamentariamente neste estudo.

Outro aspecto importante a ser observado foi a adoção incipiente da plataforma BIM pelos participantes, apesar de alguns deles possuírem experiência com a plataforma. Ao que tudo indica, a não adoção da plataforma deu-se devido as edificações projetadas terem um porte pequeno, que resultou em pouca integração com sistemas de instalações prediais, quantificação e orçamentação. Outro motivo possível é que os *softwares* BIM comumente não oferecem a possibilidade de customização de soluções arquitetônicas ditas como fora dos padrões construtivos tradicionais, conforme indicam alguns autores (GRAMAZIO e KOHLER, 2008c, p. 180; MARBLE, 2012, p. 8; SCHEURER, 2012, p. 111).

Ao todo, foram detectadas 14 ações projetuais distintas, distribuídas de modo variado ao longo do tempo por cada equipe. As ações projetuais combinaram não apenas habilidades em ferramentas de projeto, mas foram o meio pelo qual os profissionais puderam amadurecer os dilemas projetuais que emergiram durante o processo de projeto.

As principais ações levadas em conta para apreciação do quesito construtibilidade foram: análise de viabilidade construtiva (ação 06), criação de modelo estrutural (ação 10), análise estrutural (ação 11) e estudo de materialidade (ação 12).

Foi considerado como análise de viabilidade construtiva (ação 06) um subconjunto de ações mais específicas como: elaboração de detalhes construtivos, quantificação de materiais, orçamentação e estudo de propriedades físicas e de resistência dos materiais. A criação do modelo estrutural tratou da elaboração de um esquema resumido mostrando como os elementos estruturais básicos iriam se interligar e se relacionar. Já a análise estrutural considerou cálculos mais detalhados, realizados manualmente, assim como análises paramétricas das seções, deslocamento, esforço normal e momento fletor.

As ações relacionadas à parametrização foram o planejamento da modelagem paramétrica (ação 07), a modelagem paramétrica (ação 08) em si e a análise de alternativas paramétricas (ação 09). A primeira envolveu o modo através do qual a lógica do código paramétrico seria criada; a segunda, a parametrização propriamente dita; e a terceira, a análise e escolha de uma das alternativas criadas pelo código, que dependeram

diretamente da maneira pela qual a modelagem paramétrica foi concebida, possibilitando variações dentre as quais a mais adequada poderia ter sido escolhida.

Para efeito de separação da natureza das ações, o estudo volumétrico não incluiu a geração paramétrica de alternativas, considerada aqui como um estudo volumétrico “dinâmico”, quando várias possibilidades de resultados são apresentadas praticamente de modo simultâneo.

Nos grupos das categorias CE1 e CP1, as principais ações de construtibilidade adotadas foram as de número 06 e 12, uma vez que não existiam engenheiros civis nessas equipes, tampouco arquitetos ou estudantes que tivessem competência para aplicar as ações 10 e 11, específicas da engenharia estrutural.

Quadro 12 - Ações projetuais adotadas pelos grupos colaborativos.

AÇÕES PROJETUAIS		GRUPOS DE ESTUDANTES		GRUPOS DE PROFISSIONAIS					
		G1-E	G2-E	G1-P	G2-P	G3-P	G4-P	G5-P	G6-P
01	Elaboração de cronograma projetual	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○
02	Definição da modalidade colaborativa	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○
03	Estudo de referências projetuais	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○
04	Definição do partido arquitetônico	○●○○	○●○○	○●○○	○●○○	○●○○	○●○○	○●○○	○●○○
05	Estudo volumétrico	○●○○	○●○○	○●○○	○●○○	○●○○	○●○○	○●○○	○●○○
06	Análise de viabilidade construtiva	●●●●	●●●●	○●●●	○●●●	○●●●	○●●●	●●●●	○●●●
07	Planejamento da Modelagem Paramétrica	○●○○	○●○○	○●○○	○○○○	○●○○	○●○○	○●○○	○●○○
08	Modelagem Paramétrica (MP)	○●○○	○●●●	○●●●	○○●○	○●●○	○●●●	○●●●	○●●○
09	Análise de alternativas paramétricas	○○○●	○○○●	○○○●	○○●○	○○●○	○○○●	○○○○	○○○●
10	Criação de modelo estrutural	○○○○	○○○○	○○○○	○○○○	○○○○	○○●○	○○●○	○○●○
11	Análise estrutural	○○○○	○○○○	○○○○	○○○○	○○○○	○○●○	○○●○	○○●○
12	Estudo de materialidade	○○○○	○●●○	○○○○	○○○●	○○○●	○○○●	○●●●	○○○○
13	Documentação do projeto	○○○●	○○○●	○○○●	○○○●	○○○●	○○○●	○○○●	○○○●
14	Renderizações	○○○○	○○○●	○○○●	○○○●	○○○○	○○○○	○○○●	○○○●
TOTAL DE AÇÕES REALIZADAS		10	12	11	11	11	13	13	13
Legenda da realização das ações em cada um dos quatro encontros: ● (realizada); ○ (não realizada); Ex.: ○○○○ - ação não realizada ao longo dos quatro encontros; ○○●● - ação realizada no terceiro e quarto encontro.									

Fonte: Monteiro *et al.* (2021a)

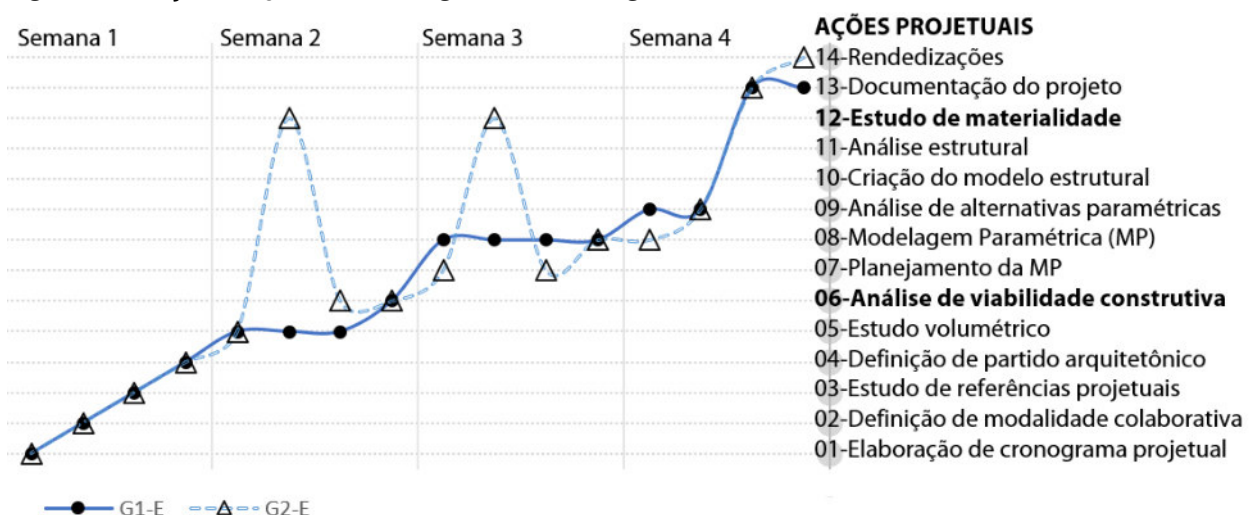
Os estudantes tiveram mais facilidade para romper a barreira da adoção da nova tecnologia, ocorrida na fase de treinamento e, assim sendo, conseguiram dedicar mais tempo para a resolução do problema de projeto, apesar de não possuírem prática como projetistas no mercado. Isso fez com que a parametrização se sobrepusesse à construtibilidade.

Já nos grupos G4-P e G5-P, houve uma forte integração entre a construtibilidade e a parametrização, com um alto balanceamento das ações projetuais desses dois quesitos ao longo de todo o processo. O grupo G6-P, por outro lado, priorizou a construtibilidade em detrimento da parametrização, em um processo que não apresentou muitas alternâncias entre ações projetuais dos dois quesitos.

No caso concreto das equipes da categoria CP2, todas as quatro ações relacionadas à construtibilidade foram adotadas (ações 06, 10, 11 e 12), diferindo em intensidade e momento. O mesmo aconteceu com a parametrização do projeto. A articulação entre construtibilidade e parametrização, em cada equipe, fica mais latente quando observada ao longo das semanas em que o projeto foi desenvolvido.

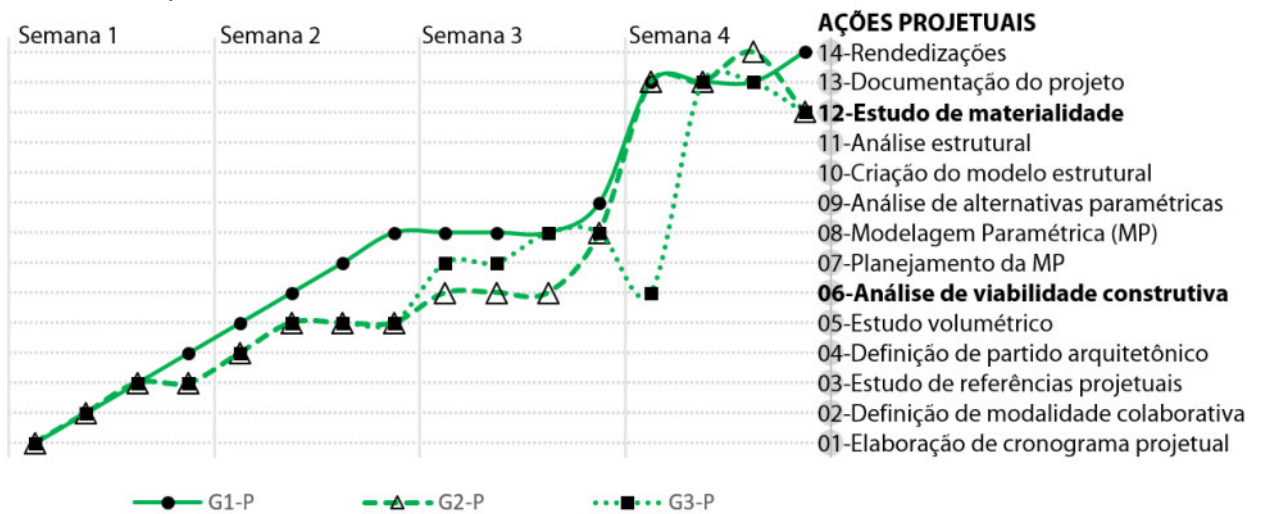
A categoria CE1 mostrou, ao longo do tempo (Figura 141), semelhança em relação ao percurso das ações em função do tempo, com exceção de estudos de materialidade realizados pelo grupo G2-E, que precisou compreender materialmente como a expansão e a contração poderiam interferir em sua proposta e nas regras a serem criadas na modelagem paramétrica. Adicionalmente, o levantamento mostrou que o G2-E investiu mais tempo em análises de viabilidade construtiva, realizando uma alta integração entre construtibilidade e parametrização.

Figura 141 – Ações projetuais da categoria CE1 ao longo das semanas.



Fonte: Monteiro *et al.* (2021b)

Também mostrando certa similaridade nas ações, a categoria CP1 pensou a construtibilidade por meio da análise de viabilidade construtiva em momentos distintos (Figura 142).

Figura 142 – Ações projetuais da categoria CP1 ao longo das semanas.

Fonte: Monteiro *et al.* (2021b)

Os dois primeiros grupos assim o fizeram entre a segunda e terceira semanas, enquanto o terceiro grupo tomou partido dessas ações na iminência da documentação do projeto (produção das representações técnicas). No quesito parametrização, cada grupo trabalhou de modo diferente: o primeiro, dedicando praticamente uma semana inteira; o segundo, utilizando parcialmente a ferramenta; e o terceiro, planejando e modelando parametricamente por uma semana. A combinação que parece ter harmonizado mais no processo de projeto e trazendo menos retrabalhos foi a do grupo G1-P, que analisou a viabilidade construtiva do edifício em estágio mais precoce, para então partirem para a parametrização.

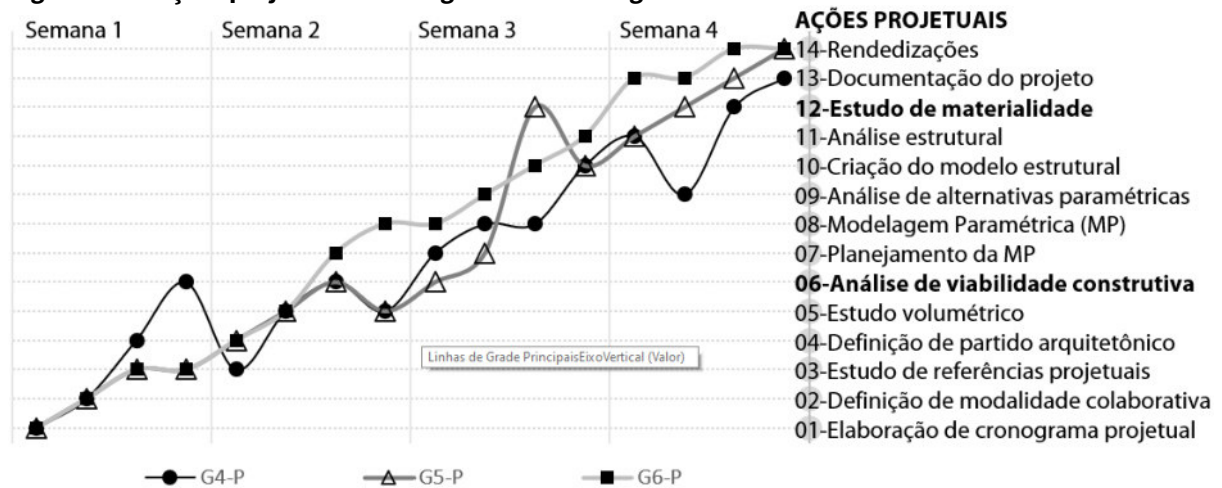
Os grupos que compuseram a categoria CP2 foram os que apresentaram o maior número de ações adotadas (Figura 143). O momento, a intensidade e a alternância de cada ação, no entanto, mostraram as diferentes maneiras de lidar com o projeto.

O grupo G4-P foi o que mais se antecipou em discutir as soluções construtivas possíveis, quando na primeira semana já debatiam formas de apoio e encaixe de suas estruturas em um projeto que sequer tinha forma definida. Isso perdurou ao longo das quatro semanas. O grupo G5-P iniciou as análises de viabilidade construtiva a partir da segunda semana, com uma forte alternância entre outras ações e a de número 06. O grupo G6-P, por sua vez, analisou a viabilidade construtiva com maior ênfase apenas na segunda semana, visto que a sua proposta não sofreu alterações desde então. Todos os três grupos tomaram partido da criação de um modelo estrutural e da análise estrutural. Já o estudo

de materialidade, surgiu em fase precoce no grupo G5-P e, na última semana, no grupo G4-P, não tendo sido adotado pelos profissionais do G6-P. De um modo geral, o gráfico chama a atenção em dois momentos: o da adoção precoce da análise de viabilidade construtiva pelo grupo G4-P e o dos constantes estudos de materialidade do grupo G5-P, já presentes a partir da terceira semana.

A parametrização dos três grupos desta categoria apareceu de maneiras distintas. Os profissionais do G4-P combinaram a *expertise* da engenheira civil em programação com o poder de abstração de um dos arquitetos, desenvolvendo um código altamente integrado às questões construtivas já presentes e àquelas que apareciam ao longo do processo. Isso lhes permitiu analisar as diferentes alternativas paramétricas com mais confiança, uma vez que todas as questões construtivas cruciais do projeto eram preservadas. Assim como o grupo anterior, o grupo G5-P desenvolveu um código quando já estavam desenvolvidas muitas questões de viabilidade construtiva. Além disso, foi durante o desenvolvimento do modelo paramétrico que os estudos de materialidade foram feitos, dando ainda mais subsídio ao projeto desenvolvido no meio computacional. A exemplo do que aponta Scheurer (2013, p. 178–182), a materialização desses protótipos foi usada para checar composições geométricas, sistemas e limitações dos processos de manufaturas, fazendo dos protótipos meios sistemáticos de projeto.

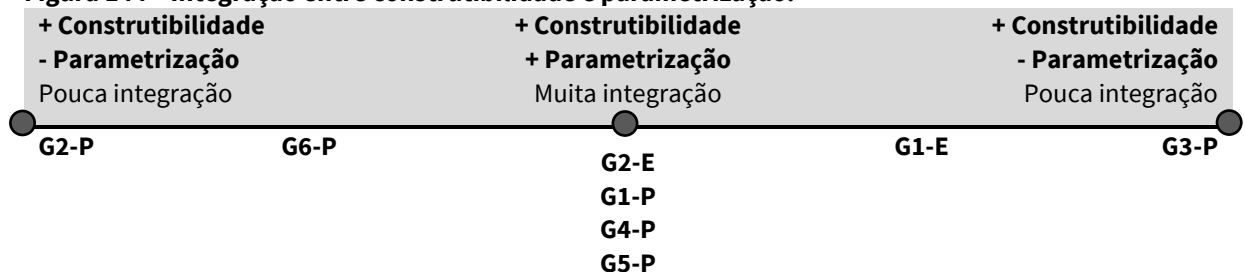
O último grupo desta categoria usou a parametrização de maneira menos efetiva, apesar de resolver bem a questão construtiva. Por ter proposto um projeto menos complexo, desenvolveu a parametrização de seu projeto com uma quantidade de algoritmos bem maior que a média dos outros grupos, em processo pouco automatizado, que pouco contribuiu com o produto projetual final.

Figura 143 – Ações projetuais da categoria CP2 ao longo das semanas.

Fonte: Monteiro *et al.* (2021b)

A ordem das ações mostradas nos gráficos das ações projetuais das categorias CE1, CP1 e CP2 foi estabelecida a partir do que foi observado como mais recorrente durante a projeção das equipes. As ações projetuais fora da linha média da curva não representam, necessariamente, que prejudicam os processos. Esses desvios podem ser naturais em razão das incertezas que envolvem a atividade projetual.

No que diz respeito à integração de construtibilidade e parametrização dos processos de projeto analisados, a quantidade de ações relacionadas à construtibilidade e à parametrização nos permitiu identificar três padrões (Figura 144), ao invés dos dois lançados como hipótese: 1) pouca integração, com maior ênfase na construtibilidade; 2) muita integração, com construtibilidade e parametrização plenamente articuladas; e 3) pouca integração, com maior ênfase na parametrização.

Figura 144 – Integração entre construtibilidade e parametrização.

Fonte: Monteiro *et al.* (2021b)

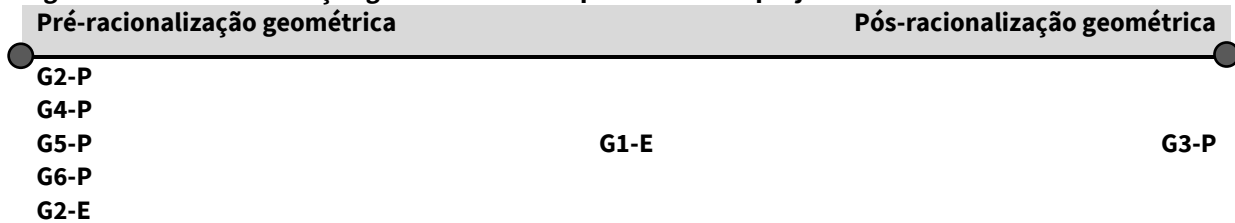
Os grupos G2-E, G1-P, G4-P e G5-P foram os que tiveram integração entre construtibilidade e parametrização, confirmando a hipótese lançada. Essa relação equilibrada fez fluir melhor o processo de projeto e gerou um produto projetual mais viável

construtivamente, equilibrando também a complexidade da forma. Nos demais grupos, a falta de integração trouxe consequências como inviabilidade construtiva ou pouca exploração de alternativas projetuais, minimizando a possibilidade de encontrar alternativas paramétricas de forma mais complexa.

Na maioria dos processos de projeto analisados, observou-se que **o pensamento matemático e algorítmico esteve presente a partir da ação projetual Definição do partido arquitetônico**. Nesse momento, as equipes analisaram as restrições projetuais impostas pelos enunciados dos experimentos e buscaram sintetizar as primeiras ideias, ainda que abstratamente, com a criação de regras e relações entre os elementos geométricos.

Outro quesito observado foi o momento da adoção da racionalização geométrica pelas equipes (Figura 145). A maior parte deles pensou em racionalizar a geometria desde as etapas iniciais do processo, com exceção do grupo G3-P, por motivos que já foram expostos. O grupo G1-E planejou como seria a racionalização dos elementos básicos do projeto (paletes de madeira), mas a sua efetiva resolução ficou para etapas mais tardias do processo. Por essa razão, ficou posicionado em situação intermédia em relação aos demais.

Figura 145 – A racionalização geométrica nos experimentos de projeto.



Fonte: Elaboração própria.

As capacitações realizadas com engenheiros civis, estudantes de arquitetura e arquitetos alcançaram um objetivo que normalmente não é comum ao que tradicionalmente vem sendo ensinado em disciplinas como o desenho técnico. Foi necessário explorar uma aplicação mais aprofundada da relação entre os elementos geométricos propostos, como aponta Pottman (2010, p. 74). Essa abordagem ajudou aos participantes dos experimentos a perceber melhor a tecnologia construtiva aplicada na concepção dos seus projetos.

Os dois experimentos realizados, apesar de aplicados a três diferentes perfis de equipe, permitiu testar a hipótese lançada na pesquisa, indicando resultados potenciais para a discussão da construtibilidade no processo de projeto paramétrico colaborativo. Para a categoria de estudantes, ficou clara a necessidade de entender duas questões. A primeira delas é como disciplinas da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa inserem a modelagem paramétrica na formação dos estudantes, e a segunda, como esses componentes curriculares se relacionam com disciplinas de projeto e tecnologia, que são a base de integração mais significativa para o uso da abordagem paramétrica no projeto em contextos educacionais, conforme aponta Romcy (2017, p.257).

4 DIRETRIZES METODOLÓGICAS

Este capítulo trata da proposição de diretrizes metodológicas para projetos paramétricos, com ênfase na construtibilidade. Incluem-se aqui um modelo inicial, sua validação por um conjunto de especialistas, e o modelo de diretrizes metodológicas final.

O modelo de diretrizes metodológicas a ser apresentado aqui é destinado a equipes colaborativas de projeto que possuam membros com habilidades mínimas em modelagem paramétrica, a exemplo do que aconteceu nos experimentos 01 e 02 realizados nesta pesquisa. Apesar de se destinar preferencialmente a profissionais, o modelo proposto pode também ser aplicado em ambiente acadêmico. Para tanto, é necessário o envolvimento de estudantes de áreas multidisciplinares, especialmente arquitetura e engenharia civil. Os estudantes devem ser capazes de incorporar ferramentas paramétricas ao processo de projeto e já ter cursado disciplinas das áreas de projeto e tecnologias construtivas. Para estas últimas, é importante que as disciplinas pelas quais tenham passado tenham abordado conteúdos relativos a materiais e métodos construtivos, assim como de estruturas.

O modelo proposto por esta tese não tem a pretensão de servir como regra incondicional a ser seguida por projetistas. Sabe-se que, a depender do contexto de colaboração, nível de conhecimento da equipe e natureza do projeto, algumas fases propostas podem estar embutidas na *expertise* dos profissionais envolvidos no processo de projeto. Trata-se, portanto, de uma proposta genérica a ser aplicada como guia para o processo de projeto paramétrico colaborativo, que pode estar sujeita a adequações.

Os dados encontrados na literatura (CORDEIRO e ROCHA, 2017; FISCHER, 2012; KLINGER, 2008; OXMAN e OXMAN, 2010), indicam que os aspectos da construtibilidade do objeto arquitetônico devem acontecer como atividade constante, desde os estágios iniciais do projeto. Esse fato pôde ser confirmado durante a análise dos processos de projeto estudados. No âmbito desta tese, escolhemos mapear os acontecimentos por meio da observação de ações projetuais adotadas pelas equipes colaborativas. Muitas ações

projetuais adotadas ao longo de um processo de projeto podem, contudo, conter saberes previamente adquiridos pelos projetistas, como, por exemplo, o caso do Toledo Gridshell, apresentado no capítulo 3. A equipe *Gridshell.it*, que desenvolveu e construiu o projeto, acumulou um conjunto de conhecimentos a partir de experiências anteriores. Esta súmula de informações prévias os fez ultrapassar, em seu modelo metodológico de projeto, certas fases que eram comumente utilizadas, como o uso de modelos físicos. Todas essas informações foram condensadas no modelo paramétrico, mas não deixaram de estar embutidas no processo de projeto.

Os itens que se seguem apresentam diretrizes metodológicas precedentes, já identificadas na literatura; um modelo inicial de diretrizes metodológicas, proposto a partir das etapas de compreensão desta tese; a validação do modelo, etapa em que a versão inicial é submetida a especialistas da área; e versão final, quando são compilados todos os dados da etapa de validação.

4.1 Diretrizes metodológicas precedentes

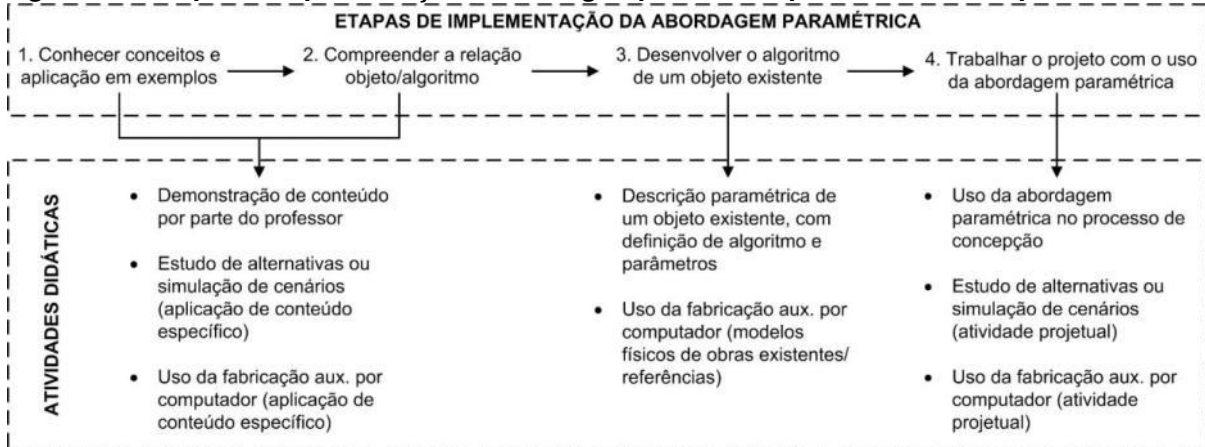
A literatura que trata do tema traz alguns trabalhos em que são propostos métodos e/ou diretrizes metodológicas para a implementação da abordagem paramétrica no projeto, aplicados ao ensino e à prática arquitetônica.

No caso do ensino, Romcy (2017, p.258) apresenta uma proposta de implementação da abordagem paramétrica em disciplina do curso de Arquitetura (Figura 146). Na proposta da autora, quatro etapas devem ser seguidas: 1) conhecer os conceitos e a aplicação em exemplos; 2) compreender a relação objeto/ algoritmo; 3) desenvolver o algoritmo de um objeto existente; e 4) trabalhar o projeto com o uso da abordagem paramétrica. Para cada uma das etapas descritas, há atividades didáticas específicas que tem de ser desenvolvidas. A estrutura sugerida deixa claro que, por se tratar de uma proposta de implementação no ensino, deve-se envolver alta carga de treinamento e compreensão da abordagem paramétrica, antes de ser direcionada para as etapas de concepção.

Devido à proposta da autora objetivar a desafiadora implementação da abordagem paramétrica no ensino de Arquitetura, não estiveram presentes detalhes de sua adoção no

processo de projeto. Consequentemente, abriu a possibilidade para o estudo aqui desenvolvido, que trata da difícil integração entre a construtibilidade e a abordagem paramétrica, tratada no modelo de diretrizes metodológicas proposto mais adiante.

Figura 146 – Etapas de implementação da abordagem paramétrica para o ensino de arquitetura.



Fonte: Romcy (2017, p.258).

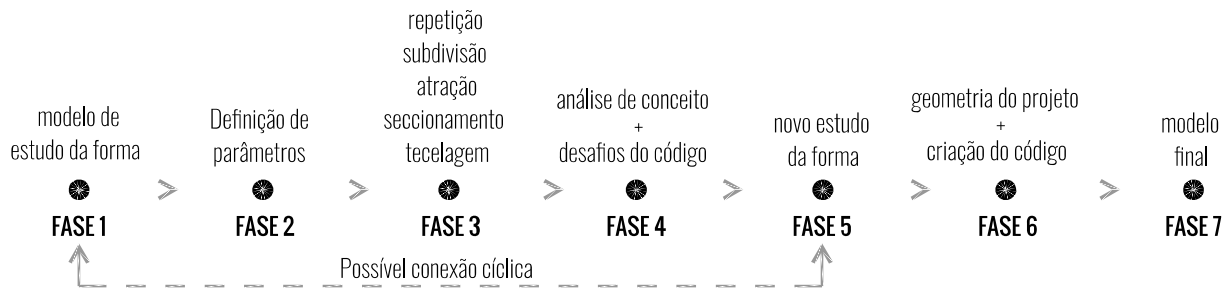
Já o estudo de Vrouwe *et al.* (2020, pp.135-144), que descreve um modelo aplicado ao ensino de projetos paramétricos em uma escola de arquitetura europeia¹¹, aplica a abordagem paramétrica mais direcionada para contextos de concepção, pelo que os autores defendem que o início do projeto paramétrico deve estar centrado no modelo físico. Denominam, assim, as suas diretrizes de “ensino de projeto paramétrico centrado no modelo”, explorando ensinamentos focados em questões conceituais. Adicionalmente, os autores descrevem sete fases, até chegar ao produto projetual, nas quais os projetistas devem seguir, conforme se aponta na Figura 147, nos quais os autores não mencionam as atividades como cíclicas, apesar de adotarem na fase 5 o novo trabalho no estudo da forma, já descrito na fase 1.

O modelo dos autores propõe que seja inicialmente criado um modelo físico para estudo da forma, na fase 1; a fase 2 fica destinada à definição de parâmetros; a repetição, subdivisão, atração, seccionamento e tecelagem ficam na fase 3; a fase 4 é aquela na qual os estudantes analisam conceitos paramétricos, fazendo revisão de literatura do conceito escolhido para o projeto; a fase 5 é dedicada ao refinamento da forma; na 6 é criada a

¹¹ University of Liège, Faculty of Architecture, Bélgica.

geometria do projeto por meio do modelo paramétrico; e, por último, a fase 7 apresenta uma das alternativas geradas pela 6.

Figura 147 – Educação em projeto paramétrico centrada no modelo.



Fonte: Adaptado de Vrouwe *et al.* (2020, p.140).

Por se tratar de uma proposta de transmissão de conceitos do projeto paramétrico, o modelo é centrado no estudo da forma, sem destinar uma das fases à discussão da implementação de materiais e métodos construtivos do objeto arquitetônico. O modelo traz, portanto, uma lacuna de exploração da construtibilidade dos projetos propostos na disciplina.

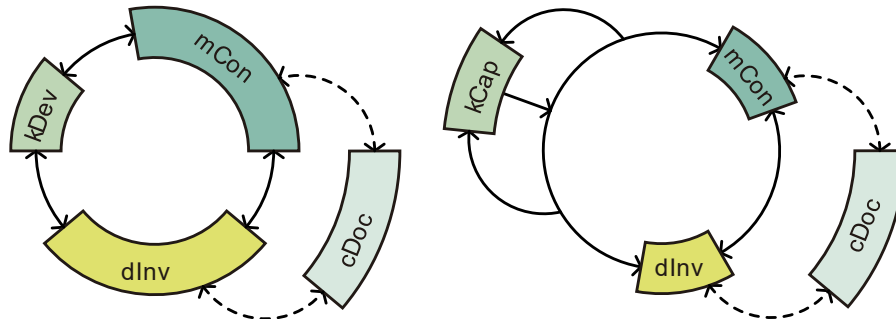
Nos dois modelos apresentados predominam, respectivamente, um misto entre a implementação da abordagem paramétrica em disciplina da área de representação e projeto; e a aplicação em contexto de concepção projetual centrada na forma (ou em contexto de concepção formal), em disciplina de projeto computacional.

A proposição de diretrizes para profissionais foi até os dias atuais pouco explorada. Hudson (2010, p.234) descreve estratégias para projetos paramétricos em arquitetura (Figura 148) voltadas para projetistas atuantes no mercado. A criação das estratégias foi baseada no envolvimento do autor como consultor em equipes de projetos paramétricos de grandes proporções. A sua tese teve como principal objetivo subsidiar a aplicação do *software Generative Components*, da fabricante *Bentley*, ao mercado da AEC, em especial, a arquitetos.

As estratégias propostas pelo autor são divididas em cinco tipos: Desenvolvimento do conhecimento (*kDev*); Captura de conhecimento (*kCap*); Construção do modelo (*mCon*); Investigação do modelo (*dInv*); e Documentação do projeto para construção (*dDoc*). Para

cada uma das estratégias, há tarefas específicas que devem ser seguidas. Todas as fases (*kDev*, *kCap*, *mCon* e *dInv*) comunicam-se entre si, à exceção da fase *cDoc*.

Figura 148 – Modelo de estratégias de Hudson (2010).



Fonte: Hudson (2010, p.231, fig. 8.4).

De modo genérico, as estratégias de Hudson (2010, p.231) possuem algum alinhamento com a proposta cíclica de Lawson (2011, p.47) para o processamento do problema de projeto. Observando detalhadamente as tarefas que devem ser desenvolvidas em cada uma das estratégias, *kCap* e *kDev* assemelham-se à análise; *mCon* à síntese; e *dInv* e *cDoc* à avaliação. Entretanto, algumas das tarefas se confundem. Um exemplo é a captura do conhecimento, que possui como uma das tarefas associadas à racionalização geométrica do projeto, e que está mais para uma ação de síntese do que de avaliação.

Com base nos resultados obtidos nas etapas de compreensão desta tese, e analisando cada uma das estratégias de implementação e estratégias deste capítulo, propomos a elaboração de um modelo inicial de diretrizes metodológicas.

4.2 Modelo inicial de diretrizes metodológicas

Neste item será descrito o modelo inicial de diretrizes metodológicas a serem aplicadas aos processos de projetos paramétricos colaborativos, com ênfase na construtibilidade. Por ter a sua aplicação a estudantes e profissionais, pressupõe que a equipe de projeto já seja capacitada em termos de ferramentas paramétricas, mesmo que recente, como foi o que aconteceu na fase de concepção dos experimentos de projeto 01 e 02 desta tese.

O modelo de diretrizes aqui proposto parte da ideia de interação colaborativa trazida pelo modelo de Chiu (2002, p. 206). Nesse modelo, já abordado no tópico 1.3 desta tese, a colaboração projetual deve ocorrer de modo que as informações projetuais estejam compreendidas num ciclo constante de consultoria, reflexões, negociação e tomada de decisões.

Adicionalmente, propomos que seja aplicado o modelo de colaboração efetiva trazido por Kvan (2000, p. 413), em que momentos de cooperação possam ocorrer, quando da realização de atividades individuais de alta especialização. Porém, a negociação e avaliação das decisões devem ser recorrentes no processo de projeto. Nesse caso, invariavelmente, pode ocorrer a alternância entre liderança vertical e horizontal, de que tratam Müller *et al.* (2018, p. 84).

É natural que, em alguns processos projetuais, a liderança vertical exerça maior predominância e, em outros, a divisão da liderança, a chamada liderança horizontal. Ambas as situações puderam ser percebidas nos estudos empíricos realizados (apresentados no capítulo 3), onde a maior ênfase para a liderança vertical ocorreu nos casos do Morpheus Hotel e da Arena do Morro. Por outro lado, ficou mais clara a divisão mais equivalente da liderança no projeto do Toledo Gridshell.

Nos experimentos de projeto com profissionais e estudantes isso também pôde ser observado. O grupo colaborativo multidisciplinar G4-P (do experimento de projeto 01) teve forte alternância de liderança. Não foi possível identificar uma liderança vertical específica, como sugere Kvan (2000, p. 413), quando diz que um líder vertical sempre terá sua presença marcada como mediador das tarefas. Já no caso do grupo G5-P, ocorreu liderança mais concentrada em um dos arquitetos da equipe, o mais experiente, que desenvolveu mais tarefas durante o processo, além de ser quem delegava a maior parte das tarefas aos demais integrantes do grupo de projetistas.

A proposta de centralizar o modelo nas interações multidisciplinares envolve mais um aspecto importante, para além dos modelos de interação propostos por Kvan (2000, p. 413), e dos dois tipos de liderança temporárias (horizontal e vertical) trazidas por Müller *et al.* (2018, p.84). É importante que os atores envolvidos compartilhem do mesmo entendimento acerca do projeto, como assinalado por Kleinsmann (2006). Esse

entendimento passa, naturalmente, pela resolução de conflitos, que devem ser resolvidos através da negociação. Desta feita, fica evidente que o ato de projetar colaborativamente envolve a habilidade de defesa de ideias, mas sobretudo o reconhecimento da potencialidade de propostas advindas dos parceiros envolvidos.

A proposta de diretrizes aqui lançada coloca a colaboração multidisciplinar como central no processo. Partindo do modelo de colaboração proposto por Chiu (2002, p. 206), e considerando os tipos de colaboração e liderança presentes, sugerimos que ele esteja permeado por ações projetuais que aqui classificaremos como **recorrentes** e **transitórias** (Figura 149).

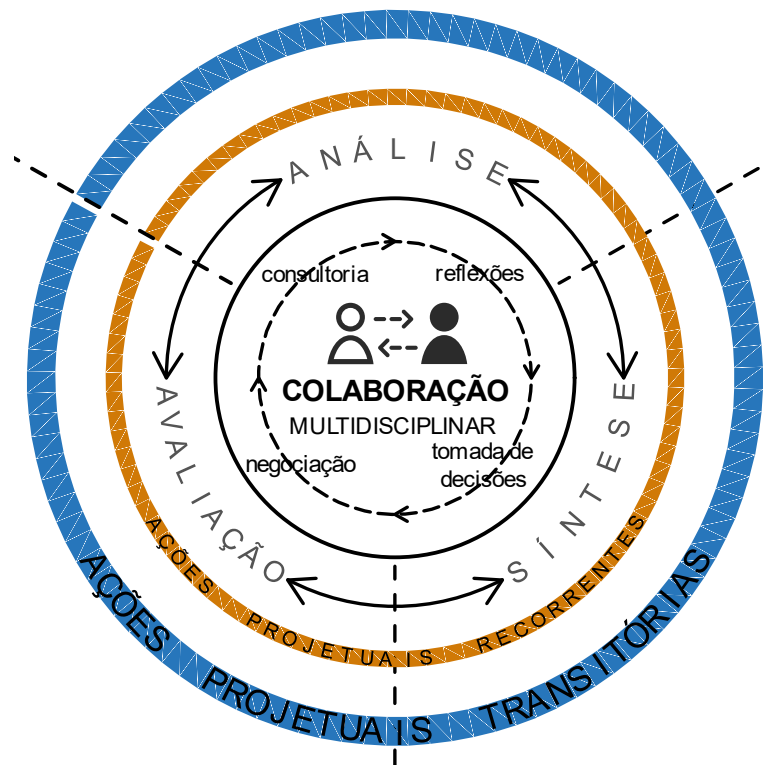
Desse modo, chamaremos aqui de **ações projetuais recorrentes** as que devem ser adotadas com alta frequência durante o processo de projeto paramétrico colaborativo. Sua recorrência não indica que são constantes ou têm grande duração. Sinaliza que os projetistas podem revisitá-las, frequentemente, em todo o ciclo de análise, síntese e avaliação Lawson (2011, p.47). Elas podem ser alternadas com outras ações, sobretudo com aquelas que subsidiem a modelagem paramétrica e a construtibilidade do objeto arquitetônico.

As **ações projetuais transitórias** são aqui classificadas como as que os projetistas transitam por elas, mas que são revisitadas com baixa frequência. Muitas podem ter duração amplamente superior às ações projetuais recorrentes, indicando que os projetistas podem investir nelas períodos contínuos e longos. Por sua transitoriedade, cada uma poderá estar presente em momentos específicos do ciclo projetual: na análise, na síntese ou na avaliação.

Defendemos que as ações projetuais devem ser tomadas considerando que a formação da equipe de projeto apresente atores com competências multiteis e multidomínios como destacado por Lebahar (1999, p.45), por entender que são fatores determinantes para que os envolvidos nos processos de projeto tenham uma gama de competências ou ferramentas capaz de buscar soluções adequadas aos problemas de projeto. Por se tratarem de projetos paramétricos, muitas dessas competências são descritas por Woodbury (2010, pp.24-48) como estratégias. Entre elas, estão o desenho à mão e o uso da matemática e computação para compreensão do projeto.

Advogamos que a essas habilidades sejam adicionadas tarefas voltadas à materialização, por ter compreendido, através da observação dos processos de projeto analisados, o quão importantes foram para ajudar a destravar os processos de projeto. Projetos como o Morpheus Hotel, a Arena do Morro e o projeto do grupo G5-P, do experimento 01, utilizaram *mock-ups* como ferramentas essenciais para a compreensão do comportamento estrutural e mecânico de suas soluções arquitetônicas. A associação de recursos computacionais aos analógicos mais tradicionais, especialmente relacionados à compreensão das restrições construtivas postas, demonstrou ser essencial.

Figura 149 – Esboço do modelo inicial de diretrizes metodológicas com ações projetuais centradas na colaboração multidisciplinar.



Fonte: elaboração própria.

Como já citado na introdução deste capítulo, propomos que a construtibilidade deve ser considerada em todos os estágios da concepção dos projetos paramétricos colaborativos. A maior parte dos processos de projeto apresentou a construtibilidade como fator de maior interferência. Kalay (2004, p.218) defende que análises de viabilidade sejam adotadas, quando da síntese do problema de projeto. Elas acontecem, segundo o autor, quando determinadas combinações atingem os objetivos do projeto, partindo da ideia de

que algumas combinações são testadas e descartadas, por serem inviáveis. As análises de viabilidades dizem respeito à “experiência do arquiteto ou da arquiteta, e de seus consultores” (*Op. cit.*, p.218).

Por isso, defendemos que sejam adotadas como **recorrentes (R)** as seguintes ações projetuais: **estudos de materialização** e constantes **análises de viabilidade construtiva**. E não apenas durante a síntese, mas em todas as etapas do processo de projeto. A seguir, descrevemos mais detalhadamente o que cada uma trata:

- **Estudo de materialização (R1):** toda e qualquer iniciativa que use protótipos, sejam eles criados analogicamente, ou com tecnologias digitais, e que sirvam como meio para troca de ideias coletivas ou reflexões individuais. Podem ser origamis, modelos físicos tridimensionais de estudo, protótipos rápidos, ou *mock-ups*. Os modelos físicos, segundo Laing (2019, s.n), “continuam a ser um instrumento poderoso de comunicação, mesmo tendo à disposição recursos digitais”. Segundo o autor, eles permitem ao projetista desenvolver ideias e promovem o engajamento coletivo, fundamentais para o projeto colaborativo.

- **Análise de viabilidade construtiva (R2):** São as ações projetuais relativas à sintetização de soluções construtivas potenciais, que consideram as restrições construtivas inicialmente lançadas. Estas ações podem envolver a racionalização geométrica, a análise de propriedades físicas dos materiais, os métodos construtivos, a criação de detalhes construtivos de encaixes estruturais, entre outros.

As **ações projetuais transitórias (T)** podem ser intercambiadas em duração e ordem, podendo ser revisitadas, mesmo que com baixa recorrência, durante o processo de projeto. Algumas delas também podem ser suprimidas, desde que a equipe tenha *expertise* suficiente para incorporá-las em alguma outra etapa, ou que esteja presente no conhecimento tácito dos projetistas. Um bom exemplo é o caso do Toledo Gridshell, neste caso o grupo de projetistas já tinha um grande *know-how* em projetos anteriores da mesma tecnologia, pelo que dispensaram os estudos de materialidade feitos com modelos físicos, uma vez que era um conhecimento tácito do grupo. Ressalta-se, mais uma vez, que a proposta de diretrizes idealizada para esta tese não pretende estabelecer regras

dogmáticas nem fundamentalistas, entendendo as incertezas e dinâmicas de cada processo de projeto.

A lista de ações transitórias que serão incorporadas no modelo proposto surgiu a partir do levantamento das ações que tiveram maior predominância durante os experimentos de projeto 01 e 02. Especialmente as que, notadamente, contribuíram para um desenvolvimento mais fluido do processo. Elas estão classificadas conforme se indicam no Quadro 13, e foram divididas no ciclo de análise, síntese e avaliação defendido por Lawson (2011, p. 47).

Quadro 13 – Classificação das ações projetuais transitórias a serem aplicadas no modelo inicial de diretrizes metodológicas.

Fases →	ANÁLISE		SÍNTESE		AVALIAÇÃO	
Ações projetuais vinculadas a cada fase →	An1	Análise de restrições formais e simbólicas	Sn1	Conceito e partido arquitetônico	Av1	MP – Análise estrutural paramétrica
	An2	Análise de restrições práticas I	Sn2	Estudo volumétrico e modelo estrutural	Av2	MP – Avaliação de alternativas
	An3	Análise de restrições práticas II	Sn3	MP – Planejamento e criação de regras;	Av3	Documentação do projeto
	An4	Estudos de referência	Sn4	MP – Criação do modelo paramétrico	--	---

MP: Modelagem paramétrica

Propomos que estejam associadas ao ciclo de **análise** as ações projetuais transitórias An1, An2 e An3 (análise de restrições projetuais) e An4 (estudos de referências).

(An1) - Análise de restrições formais e simbólicas: são aquelas que, de acordo com Lawson (2011, pp.104-105), dependem, predominantemente, do desejo do projetista ou do cliente. Eles precisam definir se o projeto será guiado por simbolismo ou por uma forma específica, mesmo que ainda não conhecida, como as formas geradas por técnicas *form-finding* ou na arquitetura baseada em morfogênese. A restrição formal “tem a ver com a organização visual do objeto” (LAWSON, 2011, p.103), e a simbólica, quando há a “utilização de algum significado simbólico como parte central do processo” (LAWSON, 2011, p.105). Esta última não pode ser confundida, contudo, com a restrição radical. A restrição simbólica

esteve presente, por exemplo, nos processos de projeto do Morpheus Hotel e do grupo G5-P, do experimento 01.

(An2) - Análise de restrições práticas I [An2-a (preexistências), An2-b (função) e An2-c (condições ambientais)]: Estão enquadradas como pré-existências os elementos relacionados ao contexto construído e natural já existente, como terreno, entorno edificado, paisagismo, condições de infraestrutura, etc.; como restrições de função, todas aquelas provenientes do programa arquitetônico, assim como todas as suas relações; e como restrições ambientais, os aspectos relacionados a conforto térmico, acústico, luminoso e à eficiência energética da edificação.

(An3) - Análise de restrições práticas II (restrições construtivas): todas aquelas que envolvem os materiais e os métodos construtivos, podendo interferir, em grande medida, na construtibilidade do edifício. Dentre elas, estão as propriedades físicas do material aplicado, suas dimensões, características estruturais; as técnicas construtivas disponíveis; a capacidade da mão-de-obra; a logística; a durabilidade; orçamentação, quantificação, entre outros.

(An4) - Estudo de referências: Implica o uso da abordagem paramétrica na concepção, que possibilita uma imensa gama de alternativas formais. Entretanto, essas possibilidades dependem da criatividade do projetista e dos recursos oferecidos pelas ferramentas manipuladas. Em razão disso, é fundamental que a equipe de projeto faça um levantamento dos precedentes ou estudo de referências. Pois, elas podem auxiliar os projetistas a se situarem “em relação à produção arquitetônica presente e anterior, além de permitir a compreensão de diferentes situações de projeto” (UNANUE, 2016, p.156).

Para a etapa de **síntese**, enquadramos as ações projetuais transitórias Sn1 (definição do conceito e partido arquitetônico), Sn2 (estudo volumétrico associado à definição do modelo estrutural), Sn3 (MP-planejamento e criação de regras) e Sn4 (MP-criação do modelo paramétrico), detalhadas a seguir:

(Sn1) - Conceito e partido arquitetônico: esta ação projetual inclui as primeiras ideias sintetizadas a partir do primeiro contato com as restrições projetuais e o estudo de referências. O conceito (ideia central que norteia o projeto) e o partido arquitetônico

(representação espacial do conceito) serão o embrião do que virá a ser o produto projetual desenvolvido durante o processo de projeto.

(Sn2) - Estudo volumétrico e modelo estrutural: propomos que as ações Sn2-a (estudo volumétrico) e Sn2-b (criação de modelo estrutural) estejam conectadas. Essa proposta é baseada no que afirma Cordeiro e Rocha (2017, p.20), quando defendem que “a forma arquitetônica necessita nascer concomitantemente a uma proposta de estrutura, para que não haja risco de inexecutabilidade, especialmente quando a forma define a própria arquitetura”. Dado o forte apelo existente na criação da forma arquitetônica de projetos paramétricos, o estudo volumétrico é uma etapa que deve ser bem maturada durante o processo de projeção. Os modelos estruturais devem ser desenvolvidos paralelamente, uma vez que têm o poder de interferir diretamente na forma arquitetônica. As duas ações devem ser conjugadas e complementares. Paralelamente, os projetistas devem tomar partido de estudos de materialização e estudos de análise de viabilidade construtiva, que devem aparecer com bastante recorrência, pois irão auxiliar os projetistas a validar ideias embrionárias propostas, ajudando-os a criar formas exequíveis construtivamente. Isso valida a assertiva de Piñón (1998, p.92), quando defende que não há arquitetura sem consciência construtiva.

(Sn3) - Modelagem paramétrica – planejamento e criação de regras: a primeira etapa do uso da ação projetual modelagem paramétrica, sintetiza o momento em que é necessário convergir as intenções projetuais em possibilidades para o código de programação. Muitos autores (HUDSON, 2010; ROMCY, 2017; SCHNABEL, 2004; VROUWE *et al.*, 2020) indicam essa etapa como a criação de parâmetros e seus critérios. É nela que será decidido que tipo de variáveis poderão existir e que interferirão diretamente na criação de alternativas a serem avaliadas mais adiante.

(Sn4) - Modelagem paramétrica – criação do modelo paramétrico: essa etapa da modelagem paramétrica trata da construção do código paramétrico em que os parâmetros imaginados têm que ser associados a uma estrutura de algoritmos que permita o processamento das ideias dos projetistas. E assim forneçam os dados de saída do código, bem como as alternativas projetuais. É comum que nesta etapa sejam adotados estudos de materialidade, pois ajudam a compreender as relações pretendidas pelos projetistas. Foi

fundamental para que os grupos G5-P (do experimento de projeto 01) e G2-E (do experimento de projeto 02) o fato de puderem ter maior entendimento da construção da lógica paramétrica que propuseram. Se tivesse sido adotado por outros grupos, tal abordagem teria facilitado a criação do modelo paramétrico.

O ciclo de **avaliação** envolve a “predição de performance das soluções propostas, para verificar que elas são consistentes umas com as outras, e que quando alcançadas, irão atingir os objetivos traçados pelos projetistas no início do processo” (KALAY, 2004, p.299). A partir dessa premissa, enquadraremos como avaliação algumas ações projetuais transitórias Av1 e Av2 (relativas à modelagem paramétrica) e Av3 (documentação do projeto). São elas:

(Av1) - Modelagem paramétrica – análise estrutural paramétrica: apesar de ser chamada de análise, a sua composição ajuda na tomada de decisões e na avaliação das possibilidades criadas. A análise estrutural é especialidade da engenharia estrutural. Deve estar presente na criação do código, mesmo antes da geração das alternativas projetuais, para que possa subsidiá-las. Logo, promovendo a viabilidade estrutural do objeto arquitetônico. Quando isso acontece, não é necessário que haja pré-dimensionamento estrutural, uma vez que todas as alternativas mais à frente geradas tenham dimensionamento confiável e otimizado.

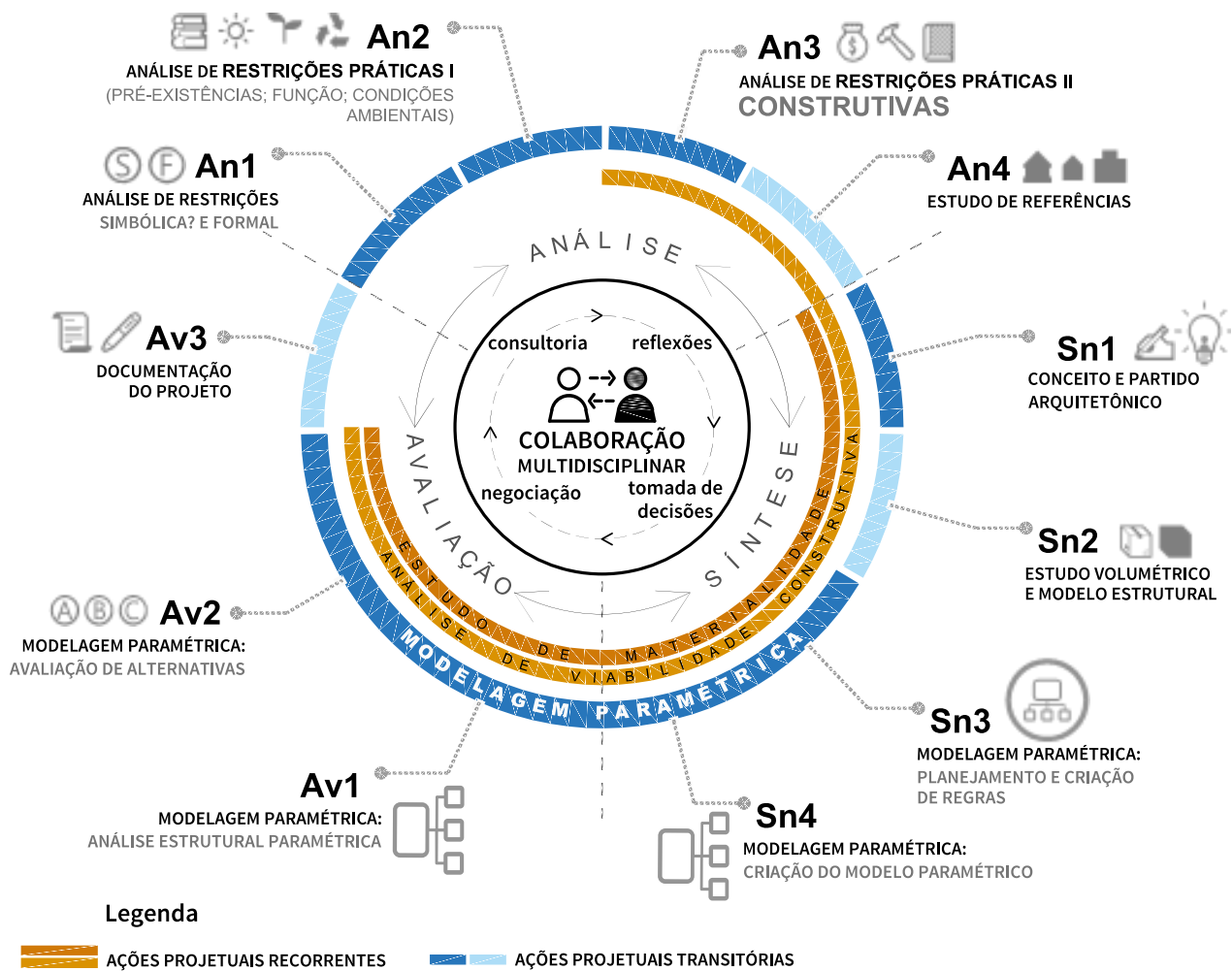
(Av2) - Modelagem paramétrica – avaliação de alternativas: corresponde à etapa final da modelagem paramétrica, a avaliação de alternativas permite aos projetistas estudar qual das soluções melhor se adequa aos problemas de projeto lançados, a partir da simples mudança de parâmetros no modelo paramétrico criado. Nesse momento, os projetistas podem revisar todas as demais ações, especialmente a análise de restrições, com o intuito de discutir e negociar o que virá a ser o produto projetual. Nesta etapa podem surgir descobertas fortuitas, fazendo com que os projetistas possam aproveitar o lado bom do inesperado, destacado por Resnick (2017, p. 125) como um importante elemento da experimentação.

(Av3) - Documentação do projeto: Após a escolha das alternativas, os projetistas partem para a documentação do projeto. Trata-se da criação das representações que serão, mais adiante, destinadas ao licenciamento do projeto e ao canteiro/estaleiro de obras, o que irá depender do orçamento da obra e da disponibilidade tecnológica do local. Esta

documentação pode ser também destinada à fabricação digital de partes do edifício. Nessa fase, ainda podem surgir inconsistências que façam os projetistas visitar outras etapas do projeto, como aconteceu no caso do Arena do Morro, pois parte da documentação do projeto foi feita em paralelo à obra, pelo que foram necessários alguns ajustes, como o encaixe dos blocos de concreto a distribuir pelas paredes do edifício com recurso ao uso de *scripts*.

A confluência das ações projetuais anteriormente classificadas e descritas resultou na composição do modelo inicial de diretrizes metodológicas, apresentado na Figura 150. Esse modelo inicial de diretrizes metodológicas possui ações projetuais que não seguem obrigatoriamente sentido nem ordem previamente definidos.

Figura 150 – Modelo inicial de diretrizes metodológicas.



4.3 Validação do modelo (Método Delphi)

Este item trata da validação do modelo de diretrizes metodológicas proposto. Como dito, o modelo inicialmente proposto foi construído a partir da etapa de compreensão, que envolveu o aprofundamento teórico, empírico e a aplicação de experimentos de projeto. Essas técnicas serão combinadas ao método de painel de especialistas, quando são agregadas opiniões de indivíduos com grande *expertise* acadêmica e profissional nesses campos. Essa combinação de *expertises* é tendência cada vez mais frequente, indicando mudanças na produção arquitetônica contemporânea, de acordo com Hensel e Nilsson (2019, pp.1-12).

A combinação das estratégias preliminares (etapas 1, 2 e 3 da pesquisa) com o painel de especialistas diminui o efeito das limitações de cada uma das metodologias (PINHEIRO; FARIAS; ABE-LIMA, 2013, p.186), ao mesmo tempo em que pode trazer maior “confiabilidade nas opiniões, deixando-as relativamente livres de bases e valores pessoais” (SUTHERLAND; BURGMAN, 2015, p.317).

4.3.1 Método de Validação

Abordagens metodológicas que utilizam especialistas, ou *experts*, podem ser realizadas para “buscar aconselhamentos pontuais, individualizados, ou através de um painel, quando vários deles são consultados” (SUTHERLAND; BURGMAN, 2015, p.317). Os autores indicam que um painel apropriado deve recorrer ao aconselhamento de especialistas “com diversidade de conhecimento em áreas relevantes” vinculadas ao interesse da pesquisa em tela. Nesse sentido, Sutherland e Burgman (2015, p.317) reforçam ainda que a confiabilidade das opiniões ocorre a partir da combinação de opiniões independentes, “ao invés daquelas trazidas pelo especialista mais notável, ou oriundas de consensos grupais não estruturados” (*ibidem*).

Para estes autores, é importante que sejam adotadas algumas estratégias, quando da consulta aos especialistas. Assim, listam-se algumas das estratégias que melhor se enquadram nesta tese:

- 1) Usar grupos, por estimarem mais consistentemente uma situação;

- 2) Escolher os membros cuidadosamente, garantindo a relação dos escolhidos com o tópico em questão;
- 3) Evitar a homogeneidade de formação;
- 4) O pesquisador/investigados não deve se sentir intimidado pelos especialistas;
- 5) Equacionar as possíveis opiniões;
- 6) Submeter as opiniões dos especialistas aos seus pares.

Quando aplicada técnica envolvendo painel de especialistas, estes “devem ser testados, suas tendências minimizadas, suas precisões melhoradas, e suas estimativas validadas com evidências independentes.” (SUTHERLAND; BURGMAN, 2015, p.317). Os especialistas, além de analisarem determinado conteúdo submetido a eles, podem “fazer crítica do instrumento ou procedimento, por terem conhecimentos relacionados aos objetivos e conceitos envolvidos no estudo” (PINHEIRO; FARIAS; ABE-LIMA, 2013, p.186). A opinião de especialistas deve ser escolhida “usando uma ferramenta de decisão apropriada” (SUTHERLAND; BURGMAN, 2015, p.318).

Uma das possibilidades de aplicação do painel de especialistas é por meio da técnica *Delphi*. As suas características envolvem as etapas de anonimato, interação e *feedback* - a retroalimentação (WOUDENBERG, 1991, p.133). A etapa de anonimato acontece quando “participantes, na maior parte dos casos especialistas, são contactados, privativamente, para participar do estudo” (*Op. cit.*, p.133). A interação acontece quando são aplicadas duas ou mais rondas de colaboração dos especialistas, “em que os participantes são estimulados a emitir estimativas acerca dos valores de parâmetros” (*Ibidem*), até então desconhecidos. A última etapa, de submissão das opiniões dos especialistas aos seus pares, exige que os resultados da interação sejam disponibilizados para a análise de todos os participantes.

Diante das vantagens e peculiaridades trazidas pelo uso das técnicas de submissão de pesquisa científica a um grupo de especialistas, escolhemos a técnica *Delphi* para aplicar ao modelo de diretrizes metodológicas inicialmente proposto. O processo foi composto de três etapas. A primeira constituiu da aplicação de um formulário eletrônico para a coleta de informações sobre a formação dos participantes, solicitando que eles avaliem as ações projetuais propostas. Na segunda etapa, os resultados das opiniões foram compilados e submetidos aos participantes, que puderam, por fim, emitir suas opiniões definitivas.

Resumidamente, seguindo a sequência de aplicação de Woudenberg (1991), propomos a seguinte estruturação para o painel de especialistas:

- **Etapas de validação 01:** consagra a coleta de informações acerca da formação e do nível de proficiência dos participantes; coleta de opinião dos especialistas quanto ao peso e às categorias das ações projetuais propostas (Apêndice G);
- **Etapas de validação 02:** consiste na compilação e submissão dos dados para a segunda coleta de opinião dos especialistas (Apêndice H);
- **Etapas de validação 03:** compreende a compilação final de dados, a partir das duas etapas anteriores de coleta da opinião dos especialistas.

4.3.2 Seleção dos especialistas

A seleção dos especialistas foi estruturada a partir das seguintes premissas básicas propostas por Sutherland e Burgman (2015, p.317):

- 1) Usar grupos, por estimarem mais consistentemente uma situação;
- 2) Escolher os membros criteriosamente, garantindo a relação dos escolhidos com o tópico em questão;
- 3) Evitar homogeneidade de atuação;

Essas premissas convergiram para a seleção de um grupo de especialistas em projetos paramétricos que têm atuado frequentemente na área, com experiência mínima de cinco anos, em pelo menos uma das seguintes atividades: a) docência, b) pesquisa/investigação e c) prática profissional. A heterogeneidade do grupo foi alcançada por meio da subdivisão dos especialistas por nacionalidade (brasileiros ou portugueses), tempo de experiência, formação (arquitetos e engenheiros civis) e atuação (acadêmica ou profissional).

Essa combinação de critérios nos fez selecionar especialistas que têm:

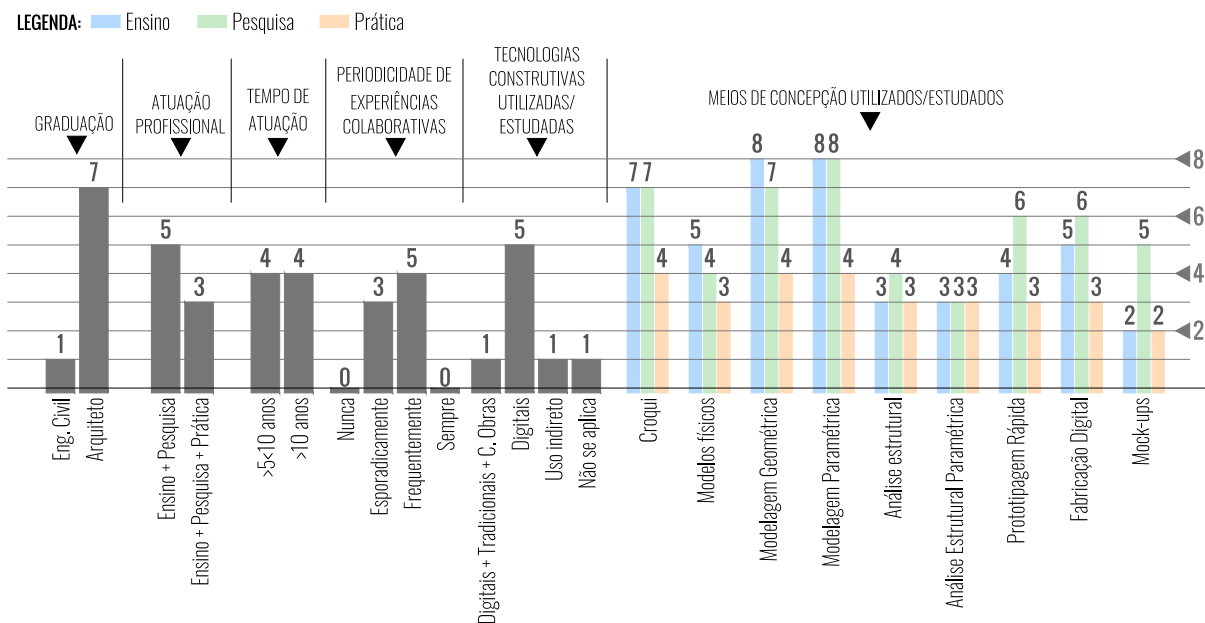
- Compreensão da língua portuguesa, tendo nacionalidade preferencialmente brasileira ou portuguesa;
- Doutorado/doutoramento em arquitetura ou engenharia civil;

→ Atuação, há pelo menos cinco anos: a) no ensino e/ou pesquisa de projeto paramétrico aliado a tecnologias construtivas; b) como projetistas que utilizam a modelagem paramétrica em suas práticas projetuais.

Ao todo, oito especialistas participaram da etapa de Validação, e foram submetidos ao Método Delphi. Por uma questão de balanceamento, disponibilidade e heterogeneidade de atuação, a metade deles têm formação no Brasil, e a outra metade em Portugal.

As respostas dadas ao formulário eletrônico desta etapa (Figura 151) possibilitaram traçar o perfil dos participantes. Dos oito participantes selecionados, sete são arquitetos, e um engenheiro civil. Cinco deles têm entre cinco e 10 anos de experiência na área, enquanto os outros três atuam há mais de uma década. Quanto à atuação profissional, todos atuam como professor e pesquisador/investigador, e a metade deles também atua na prática, como projetistas.

Figura 151 – Perfil de atuação dos especialistas.



Fonte: Elaboração própria a partir das respostas ao formulário eletrônico.

Dada a importância da colaboração nos processos projetuais investigados, questionamos quantos deles possuíam experiências em contextos colaborativos. A metade dos inquiridos disse que as experiências eram esporádicas, e a outra metade reafirmou estar frequentemente envolvidos com equipes colaborativas, seja no ensino, pesquisa/investigação ou prática projetual. Além da colaboração, outro aspecto sondado foi o envolvimento dos participantes com tecnologias construtivas. A maioria tem contato constante apenas com as tecnologias digitais (fabricação digital), e apenas dois deles se envolve, complementarmente, com as tecnologias tradicionais e o canteiro/estaleiro de obras.

Em seguida, perguntamos quais os meios de concepção eram mais utilizados/estudados por eles durante a sua atuação (no ensino, pesquisa/investigação e prática), tendo sido verificada uma presença maior do uso das modelagens/modelações geométrica e paramétrica.

Por outro lado, os recursos como a análise estrutural (não-paramétrica e paramétrica) são os menos utilizados/estudados pelos inquiridos. Possivelmente, pode ser uma consequência do plano de estudos da graduação dos participantes ser em arquitetura, uma vez que há uma tendência acadêmica de pouca especialização dos engenheiros civis na área. Outro ponto se que chama à atenção no gráfico do perfil de atuação dos especialistas é a pouca menção ao recurso *mock-up*, tanto no ensino quanto na prática. O que reforça a dificuldade de aplicação deste último recurso, sobretudo em razão da cultura de que sua execução envolve um alto custo. Contudo, a depender da tipologia do objeto arquitetônico projetado, há a possibilidade de executar *mock-ups* com custo reduzido, como já visto anteriormente aquando do experimento 01, executado pelos grupos G4-P e G5-P na UFRN.

As informações coletadas ajudaram a dimensionar o nível de envolvimento dos especialistas consultados nos quatro tópicos que estruturaram as categorias de análise dos processos de projeto estudados na tese: I) problema de projeto, II) construtibilidade, III) projeto colaborativo e IV) meios de concepção. Dessa maneira, verificou-se que algumas barreiras observadas nos processos de projeto analisados também se aplicam à atuação dos especialistas, tais como o trabalho em ambiente colaborativo multidisciplinar; a

integração entre tecnologias tradicionais e digitais; e o uso de meios de concepção como a análise estrutural e o *mock-up*.

4.3.3 Processo de Validação

O método Delphi foi executado por meio de dois formulários, onde se lançaram questões de natureza qualitativa e quali-quantitativa. Solicitamos inicialmente que os especialistas acrescentassem as suas leituras críticas acerca da estrutura proposta.

Foi indicado, quase que unanimemente, que deveria haver uma mudança na dinâmica do modelo apresentado, uma vez que ainda não transmitia a plena ideia de ser um processo cíclico. Segundo os especialistas, deveria ser indicado que as ações são interativas, simultâneas e cíclicas, com a possibilidade de se comunicarem durante o processo. Os apontamentos acima reforçam o que já está posto na literatura (ANDRADE *et al.*, 2011, p.91; KALAY, 2004, p.10; LAWSON, 2011, p.47).

Alguns especialistas também fizeram apontamentos isolados. Um deles não concordou com a distinção entre as ações Sn3 (planejamento e criação de regras da modelagem/modelação paramétrica) e Sn4 (criação do modelo paramétrico). Outro, apontou que os estudos de materialidade e as análises de viabilidade construtiva podem relacionar-se com as dimensões simbólica e formal, assim como as pré-existências e as condições ambientais. Por último, foi também apontado que uma alternância nos tons das cores atribuídas às ações poderia ajudar na leitura do modelo.

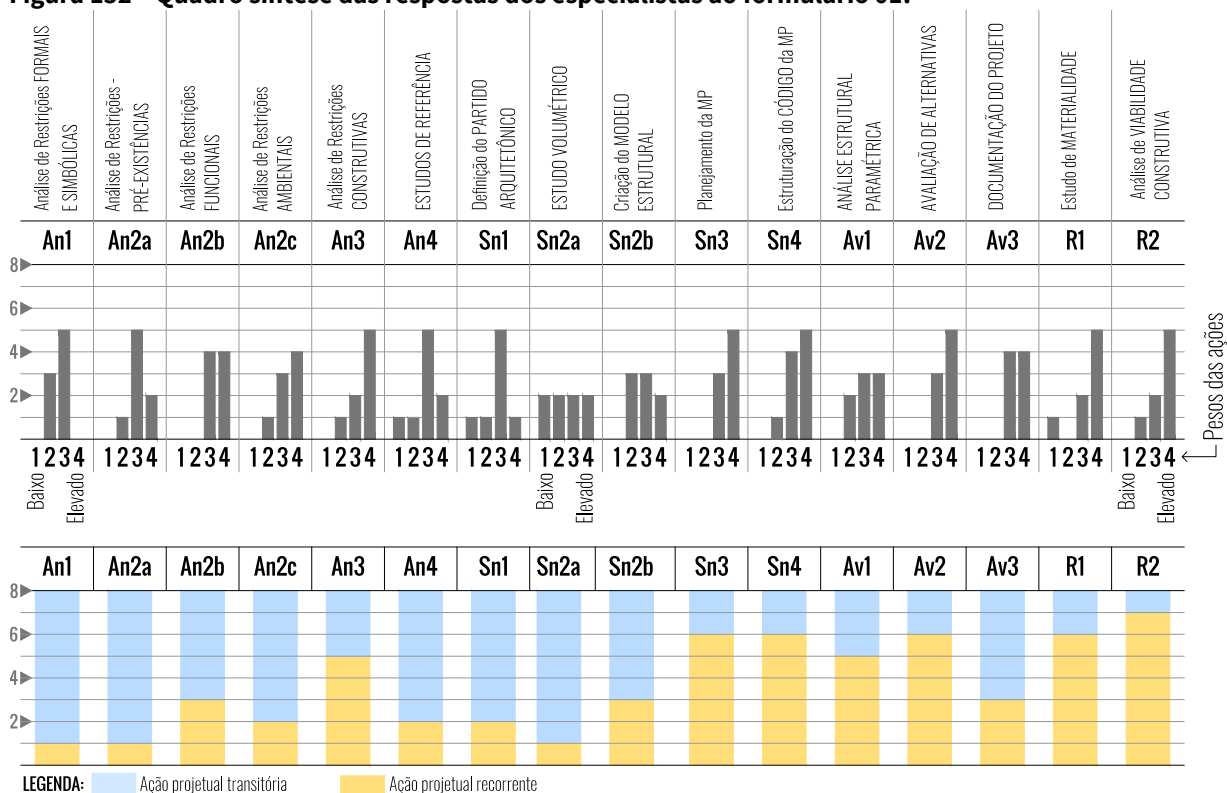
Para sanar o primeiro apontamento, renomeamos as ações, deixando mais claro que o planejamento trata-se de uma etapa preliminar à estruturação do código propriamente dito. No segundo, ajustamos graficamente o movimento cíclico das ações projetuais, contribuindo para que essas associações sejam definidas pelos próprios projetistas.

Subsequentemente, foi solicitado aos especialistas que atribuíssem, em escala *quali-quantitativa*, um peso de 1 (Baixo) a 4 (Elevado) para cada uma das ações projetuais apresentadas. Foi também pedido que estes categorizassem as ações listadas como **transitória** ou **recorrente**, a fim de confirmar ou refutar a proposta inicialmente desenvolvida.

Os resultados da primeira (Figura 152) ronda mostraram que os especialistas atribuíram mais vezes os pesos 3 e 4 para as seguintes ações:

- Análise de restrições de pré-existências (An2-a)
- Análise de restrições funcionais (An2-b);
- Análise de restrições ambientais (An2-c);
- Análise de restrições construtivas (An3);
- Planejamento da modelagem/modelação paramétrica (Sn3);
- Estruturação do código na modelagem/modelação paramétrica (Sn4);
- Avaliação de alternativas (Av2);
- Documentação do projeto (Av3);
- Estudo de materialidade (R1);
- Análise de viabilidade construtiva (R2).

Figura 152 – Quadro síntese das respostas dos especialistas ao formulário 01.

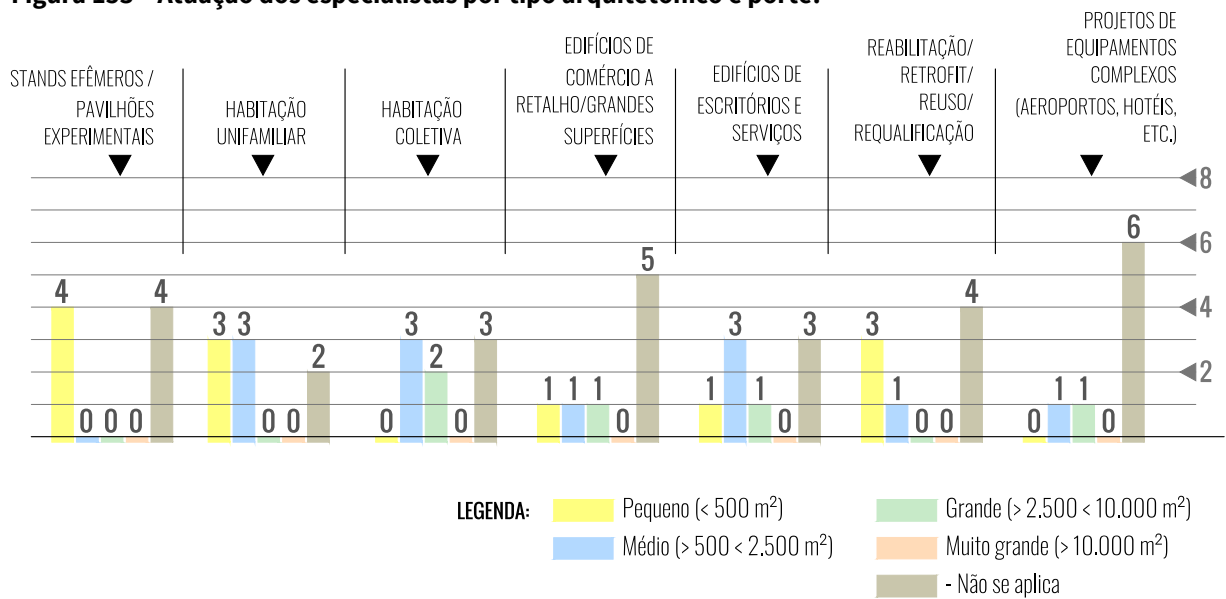


O modelo inicial de diretrizes metodológicas apresentado aos especialistas considerou que apenas duas das 16 ações (1/8) seriam recorrentes (R1 e R2), e as outras 14

(7/8), transitórias. Contudo, após uma primeira análise, a grande maioria deles indicou que pelo menos sete ações (7/16) deveriam mudar de transitória para recorrente.

A elaboração do modelo preliminar exposto aos participantes desta fase considerou as etapas dos capítulos anteriores da tese, sobretudo em relação aos experimentos de projeto. Como a escala dos projetos desses experimentos foi menor, tanto pelo tamanho mais reduzido do edifício, quanto no número de projetistas, o modelo preliminar pode ter desconsiderado alguns fatores desconhecidos até então.

Assim, ficou evidente que as respostas poderiam variar de acordo com os tipos (e respectivos portes) dos projetos com os quais os especialistas poderiam estar mais familiarizados. Pois esses fatores podem ter interferido significativamente nas suas leituras. Em razão disso, iniciamos a etapa de validação 02 com uma questão relativa aos tipos arquitetônicos, e seus respectivos portes, para os quais os especialistas eram solicitados a fazer uma leitura mais do âmbito profissional (seja no ensino, pesquisa ou prática projetual). O resultado (Figura 153) apontou que a atuação deles, apesar de diversificada, era predominantemente em habitação e *stands* efêmeros/pavilhões experimentais, de porte pequeno e médio. Para projetos de equipamentos complexos, de orçamentos maiores, apenas dois relataram já ter tido a oportunidade de explorar âmbitos de maior complexidade.

Figura 153 – Atuação dos especialistas por tipo arquitetônico e porte.

Fonte: Elaboração própria a partir das respostas ao formulário eletrônico.

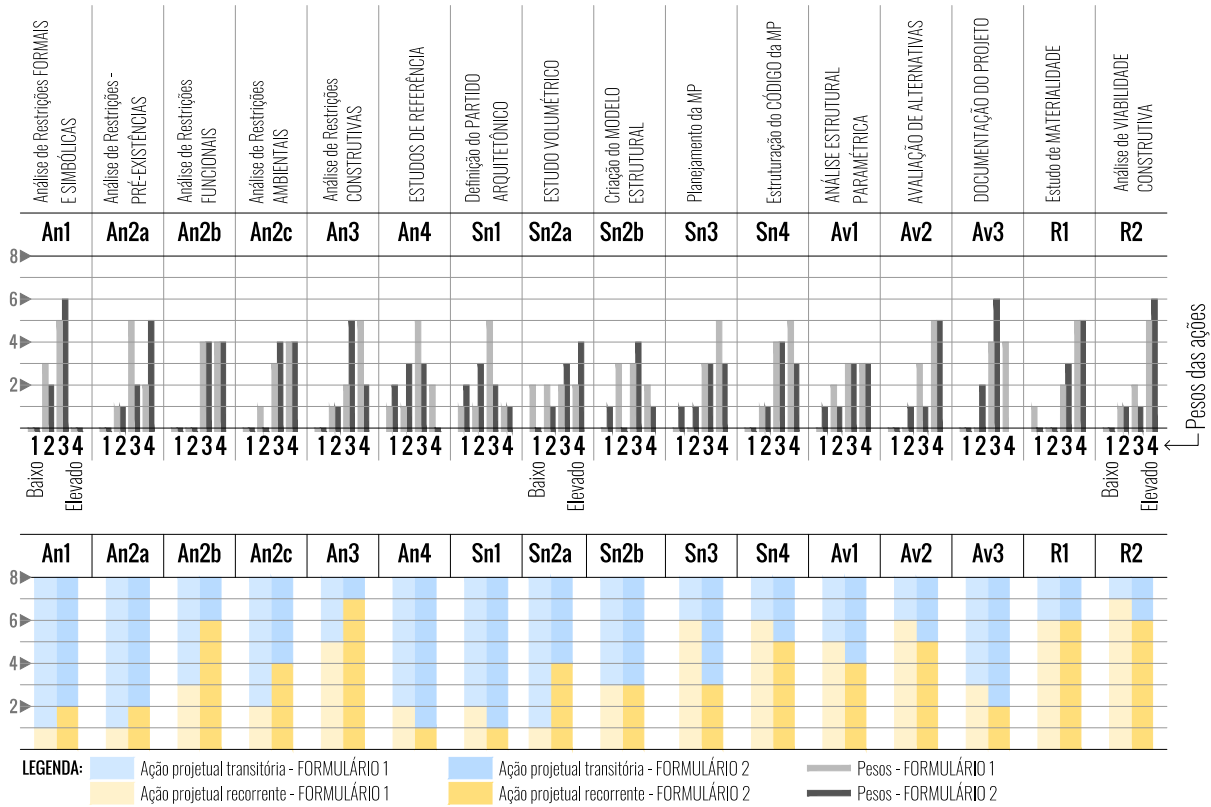
Esse resultado leva a pressupor que a Validação do modelo pode estar mais direcionada à aplicação em projetos de pequeno (até 500,00 m²) e médio porte (entre 500 e 2.500,00 m²). Projetos de maior complexidade e área devem levar a uma revisão do modelo proposto.

Submetemos os dados do primeiro formulário aos especialistas, pedindo que indicassem uma nova atribuição de pesos e uma nova categorização para as mesmas ações projetuais lançadas no primeiro formulário aplicado, possibilitando-nos avaliar, comparativamente, as respostas dadas aos dois inquéritos (Figura 154). Se comparadas com as respostas da primeira ronda, as da segunda migraram significativamente em seis ações projetuais, seja nos pesos atribuídos ou na sua categorização. Subsequentemente, consideramos, face à avaliação feita, renomear algumas das codificações atribuídas às ações (Quadro 14), para melhor posicioná-las no modelo final e, consequentemente, facilitar a sua interpretação.

As respostas foram condensadas no Quadro 15, onde podem ser observadas as codificações inicial e final de cada ação projetual, as respostas individualizadas dos especialistas, assim como a média aritmética dos pesos atribuídos e a predominância das

categorias atribuídas às ações projetuais. Nele também estão destacadas as principais mudanças ocorridas do primeiro para o segundo formulário.

Figura 154 –Quadro síntese das respostas dos especialistas aos formulários 01 e 02.



Quadro 14 – Códigos e nomenclaturas das ações projetuais consolidadas.

Nº	Código INICIAL	Código FINAL	AÇÃO PROJETUAL	
1	An1	An1	Análise de restrições Formais e Simbólicas	Análise
2	An2-a	An2	Análise de restrições de Pré-existências	
3	An2-b	An3	Análise de restrições Funcionais	
4	An2-c	An4	Análise de restrições Ambientais	
5	An3	An5	Análise de restrições Construtivas	
6	An4	An6	Estudos de Referências Projetuais	
7	Sn1	Sn1	Definição do Partido Arquitetônico	Síntese
8	Sn2-a	Sn2	Estudo Volumétrico	
9	Sn2-b	Sn3	Criação do Modelo Estrutural	
10	R1	Sn4	Estudo de Materialidade	
11	Sn3	Sn5	Planejamento da Modelagem Paramétrica	
12	Sn4	Sn6	Estruturação do código na Modelagem Paramétrica	
13	Av1	Av1	Análise Estrutural do Modelo Paramétrico	Avaliação
14	Av2	Av2	Avaliação de soluções alternativas	
15	R2	Av3	Análise de viabilidade Construtiva	
16	Av3	Av4	Documentação do projeto	

Legenda: Ação projetual sem alteração de nomenclatura ou código;

Quadro 15 – Painel de especialistas com respostas aos formulários 1 e 2.

AÇÕES PROJETUAIS			Expert 1		Expert 2		Expert 3		Expert 4		Expert 5		Expert 6		Expert 7		Expert 8		Média*	
Cod. Inicial	Cod. Final	Form.→	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
An1	An1	Peso →	3	3	2	2	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	3	2,6	2,7
		Cat. →	T	T	T	T	T	T	T	R	T	T	T	R	R	T	T	T	T	T
An2-a	An2	Peso →	3	4	4	4	3	3	3	3	4	3	3	4	2	2	3	4	3,1	3,4
		Cat. →	T	T	T	T	T	T	T	T	R	T	T	R	T	T	T	R	T	T
An2-b	An3	Peso →	3	4	3	3	4	3	4	4	4	4	3	4	3	3	4	3	3,5	3,5
		Cat. →	T	R	T	R	T	T	R	R	R	T	T	R	T	R	R	R	R	R
An2-c	An4	Peso →	2	4	4	4	4	3	4	4	3	4	3	3	2	3	4	3	3,2	3,5
		Cat. →	T	T	T	R	T	T	R	R	T	T	T	T	T	R	R	R	T	TR
An3	An5	Peso →	2	3	3	3	4	3	4	4	4	4	3	2	4	3	4	3	3,5	3,1
		Cat. →	T	R	R	R	T	T	R	R	R	R	T	R	R	R	R	R	R	R
An4	An6	Peso →	3	3	2	1	3	3	1	1	3	3	3	2	4	2	3	2	2,7	2,1
		Cat. →	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	R	R	R	T	T	T	T	T
Sn1	Sn1	Peso →	3	2	3	2	4	4	1	1	3	3	3	3	3	2	2	1	2,7	2,2
		Cat. →	T	T	R	T	T	T	T	T	T	T	R	R	T	T	T	T	T	T
Sn2-a	Sn2	Peso →	1	3	2	3	4	4	1	2	3	4	3	3	4	3	2	3	2,5	3,1
		Cat. →	T	T	R	R	T	R	T	T	T	T	T	R	T	R	T	R	T	TR
Sn2-b	Sn3	Peso →	3	3	2	3	4	3	4	4	3	4	2	1	2	3	4	3	3,0	3,0
		Cat. →	R	T	T	T	T	R	T	R	T	T	T	T	R	R	R	T	T	T
R1	Sn4	Peso →	1	3	4	4	4	4	4	4	3	4	3	3	4	3	4	4	3,4	3,6
		Cat. →	R	R	R	R	R	R	R	T	T	R	T	R	R	T	R	R	R	R
Sn3	Sn5	Peso →	4	4	3	3	4	3	4	4	3	4	3	1	4	3	4	2	3,6	3,0
		Cat. →	R	R	T	T	T	T	R	T	R	R	R	T	R	R	R	T	R	T
Sn4	Sn6	Peso →	4	4	2	3	4	4	3	4	3	3	3	1	3	3	4	2	3,2	3,0
		Cat. →	R	R	T	R	T	T	R	R	R	R	R	T	R	R	R	T	R	R
Av1	Av1	Peso →	3	4	2	3	3	3	4	4	4	4	3	1	2	3	4	2	3,1	3,0
		Cat. →	R	R	T	T	T	T	R	R	R	R	R	T	T	R	R	T	R	TR
Av2	Av2	Peso →	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	3	3	3	4	3,6	3,6
		Cat. →	R	R	R	T	T	R	R	T	T	R	R	R	R	R	R	T	R	R
R2	Av3	Peso →	2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	2	4	3	4	4	3,5	3,6
		Cat. →	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	T	T	R	T	R	R	R	R
Av3	Av4	Peso →	3	3	4	2	4	3	4	3	4	3	4	3	3	2	3	3	3,6	2,7
		Cat. →	T	T	T	T	R	T	T	T	R	T	R	R	T	R	T	T	T	T

Legenda: Form. (Formulário); Cat. (Categoria); Mod. (Modelo); T (Ação Projetual Transitória); R (Ação Projetual Recorrente); R/T (Ação projetual sem consenso entre os especialistas); XX (Alterações significativas);

*A média (aritmética) refere-se à consolidação dos formulários 1# e #2. Nas Categorias, considerou-se a predominância da ação projetual apontada pelos especialistas.

Fonte: Elaboração própria a partir das respostas ao formulário eletrônico.

A partir de agora, as ações serão referidas pelas novas codificações estabelecidas. Em relação aos pesos atribuídos, a consolidação do método *Delphi* chama à atenção para a alteração em quatro ações projetuais. As ações An4 (Estudos de Referências Projetuais), Sn5 (Planejamento da Modelagem/modelação Paramétrica) e Av4 (Documentação do projeto) perdem importância, na opinião consensual deles. Por outro lado, a ação Sn2 (estudo volumétrico) passa a ter mais peso. Isso indica que **a concepção arquitetônica ainda está**

fortemente ligada aos (constantes) estudos volumétricos, que puderam ser observados em quase todos os processos de projeto analisados. Esta ação (Sn2) continua a ser uma peça-chave nos fluxos digitais de trabalho dos projetistas.

No que se refere à consolidação das categorias, os inquiridos não entraram em consenso em relação às ações An4 (restrições ambientais), Sn2 (estudo volumétrico) e Av1 (análise estrutural do modelo paramétrico). Metade deles as considerou como transitória, e a outra metade, como recorrente. Presumimos que possa haver interpretações variadas devido ao modo com que cada um deles os associa em função de suas experiências anteriores, pelo que não é possível estabelecer uma regra definida.

A segunda ronda de respostas também permitiu aos especialistas mudar radicalmente a categoria da ação Sn5 (planejamento da modelagem paramétrica), que alterou de recorrente para transitória. A origem desta mudança pode residir no fato de ser uma etapa que antecede a construção do código do modelo paramétrico, ocupando apenas uma parte do processo de projeto paramétrico. Pelo que faz mais sentido que assim seja classificada.

Os resultados do painel de especialistas permitiram analisar como as ações foram interpretadas pelos especialistas, a partir do peso e da categorização de cada ação, que alimentarão o modelo final.

Isso poderá indicar que as condições específicas devem ser consideradas em diferentes processos de projetos paramétricos colaborativos. Projetos de escalas significativamente distintas, como o Toledo Gridshell e o Morpheus Hotel têm, notadamente, as diferentes dinâmicas e fluxos de trabalho, na direção do que apontam os diversos autores (MARBLE, 2012; SCHEURER, 2012; WORTMANN e TUNÇER, 2017).

A partir das mudanças observadas durante o processo de Validação descrito até então, apresenta-se a seguir o processo de construção do modelo final.

4.4 Modelo de diretrizes metodológicas final

A compilação dos dados da etapa de validação, assim como do seu processo, permitiu revisar o modelo de diretrizes metodológicas inicial, incorporando as atualizações advindas das respostas pontuais e consensuais dos especialistas.

Desta maneira se reitera que o modelo de diretrizes metodológicas seja composto pelas ações projetuais que acontecem ciclicamente, sem ordem nem posição previamente definidas. Com efeito, este foi o aspecto que muitos especialistas sugeriram que ficasse mais claro no modelo final. O que levou à criação de uma avenida cíclica de comunicação, nos moldes do que indicam Andrade *et al.* (2011, p. 91), e que permeia a atividade colaborativa para onde as ações são direcionadas. Assim, foi proporcionado o movimento cíclico das ações presentes no processo de projeto paramétrico.

É também inegável que o processo de projeto dificilmente começaria por meio da sua documentação (Av4) ou pela sua avaliação de soluções alternativas (Av2), uma vez que é necessário executar certas ações para se chegar a elas. Com isso, estabeleceu-se um ponto de início para as ações, sugerido por um dos especialistas consultados, que fica exatamente após a etapa de documentação (Av4).

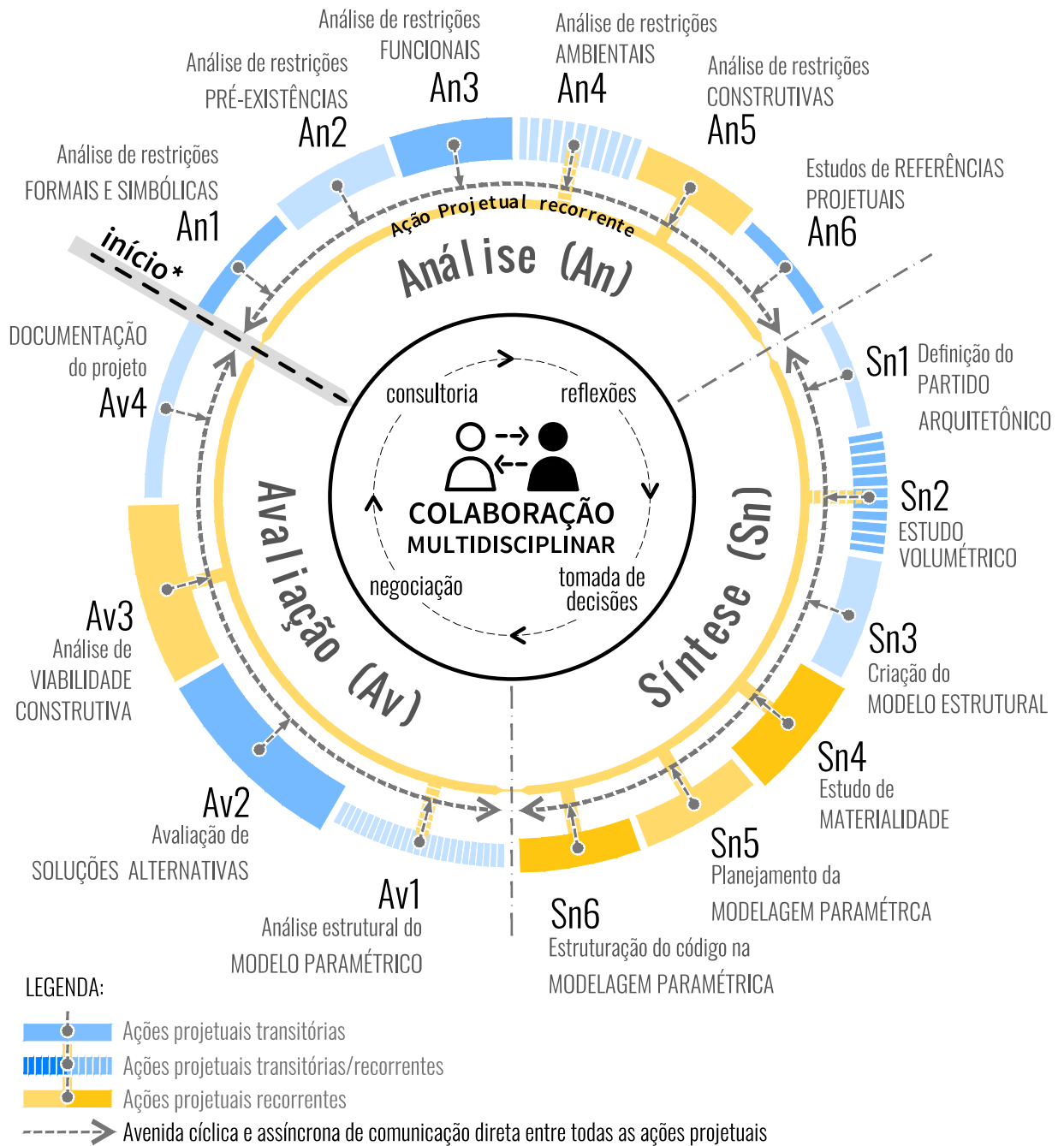
Motivadas pelos contributos dados pelos especialistas, as alterações mais significativas em relação ao modelo inicial referem-se à inserção dos pesos em cada ação, representados graficamente pela espessura de cada barra, à categorização (transitória ou recorrente), às codificações (An1, An2, etc.) e ao modo de comunicação entre as ações, para reforçar a integração cíclica entre elas. Também foram introduzidas alterações gráficas, uma vez que a alternância de tons nas cores das ações poderia ajudar na alternância entre elas. Apresentamos, a seguir, o modelo final de diretrizes (Figura 155).

Dada a forte relação que os projetos paramétricos têm com a forma, e em razão da complexidade dos seus processos construtivos, sugere-se que duas aplicações possíveis: 1) para projetos que iniciam com a escolha do material, a exemplo da sequência defendida no Novo Estruturalismo dos Oxman (2010, p.15) ou 2) para projetos que iniciam a partir da forma, normalmente mais atrelado à sequência tradicional indicada pelos autores (*Ibidem*, 2010, p.15).

O primeiro caminho sugere que o material direciona o processo de projeto. Os projetistas devem analisar criteriosamente todas as peculiaridades envolvidas no material disponibilizado ou escolhido. A partir daí, sempre devem tirar partido das ações projetuais An5 (análise de restrições construtivas) e Av3 (viabilidade construtiva). Para o segundo caso, o do projeto baseado na forma, propomos que os projetistas explorem a An1 (análise de restrições formais e simbólicas), bem como a An6 (estudos de referência), e após definirem o conceito e o partido arquitetônico, alternem para ações que se adaptem melhor à sua dinâmica projetual.

Para o âmbito profissional, sugere-se que este deve ser o principal (mas não o único) foco do modelo, pois defendemos que os profissionais interessados em compreender o processo de projeto paramétrico colaborativo devem passar por uma etapa prévia de capacitação nas ferramentas paramétricas, que deve preceder a aplicação do modelo final de diretrizes.

É importante destacar que, apesar da aparente ordenação do ciclo de análise, síntese e avaliação (LAWSON, 2011), presente no modelo final, os processos de projeto paramétricos podem trazer surpresas. A manipulação de parâmetros, e a consequente geração de alternativas projetuais, podem conduzir os projetistas a descobertas fortuitas, de cenários inimagináveis sem o uso deste tipo de abordagem projetual. Como dito, Isso faz com que os projetistas aproveitem o lado bom do inesperado, um dos importantes elementos da exploração projetual, de acordo com Resnick (2017, p. 125).

Figura 155 – Modelo de diretrizes metodológicas final.

No que concerne o contexto educacional, preconiza-se que sejam combinadas diretrizes de implementação da modelagem/modelação paramétrica que unam as etapas de capacitação e concepção, como nos modelos propostos por Romcy (2017, p.258) e Vrouwe *et al.* (2020, p.140). Subsequentemente, sugere-se que o modelo de diretrizes metodológicas final desta tese possa vir a ser adotado por estudantes que já tenham tido contato prévio com projetos paramétricos e as disciplinas associadas às áreas das tecnologias construtivas. Essa é, pois, a base necessária, uma vez que ter habilidades com as ferramentas computacionais paramétricas e o conhecimento de métodos e sistemas construtivos são condições essenciais, em particular, para a implementação da construtibilidade nos processos de projetos paramétricos colaborativos.

Retomando o que foi discutido no processo de Validação, conclui-se que o modelo é mais confiável quando aplicado a projetos menores, em escala semelhante à de projetos como o Toledo Gridshell e os projetos desenvolvidos nos experimentos realizados no âmbito desta tese. Isso se justifica porque o modelo inicial foi desenvolvido a partir de premissas baseadas predominantemente em projetos de menor área/volume de construção e de tipos semelhantes aos utilizados/estudados pelos especialistas consultados.

Por último, o modelo proposto não indica, que é a única maneira de desenvolver projetos dessa natureza. O Toledo Gridshell, por exemplo, foi projetado a partir de uma metodologia própria da equipe de projetistas, desenvolvida ao longo do tempo. Isso não quer dizer, que a dinâmica utilizada por eles seja de fácil aplicação para outras equipes. Como se enfatizou, a ideia consistiu em propor um modelo amplo e genérico, que possa ser implementado como guia tanto por estudantes como por profissionais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No total, foram analisados onze processos de projetos paramétricos nessa pesquisa e distribuídos da seguinte maneira: três na parte referente aos estudos empíricos (projetos desenvolvidos em contexto profissional), seis no âmbito do experimento de projeto 1 (mestrado profissional na UFRN) e dois no experimento de projeto 2 (disciplina na FA/ULisboa).

Cada uma das etapas de levantamento de dados teve a sua especificidade e contexto de aplicação distinto, por isso, não podem ser comparadas de maneira equitativa. Contudo, é possível tirar relações a partir de aspectos obtidos nos resultados, que aproximam, de modo geral, a condução dos processos de projetos paramétricos colaborativos.

Neste último capítulo, apresentamos uma súmula de considerações conclusivas a partir de três tópicos que a estruturam: Síntese dos resultados; Conclusões; e Limitações e desafios para trabalhos futuros.

Síntese dos resultados

A partir do que foi estudado no referencial teórico-conceitual, referencial empírico e dos experimentos de projeto, foram tiradas conclusões acerca de como a construtibilidade do edifício pode interferir nos processos de projetos paramétricos colaborativos. Esses capítulos permitiram construir um panorama amplo acerca da integração entre a construtibilidade e o projeto paramétrico, para adotar abordagens de investigação distintas.

O capítulo 1 (referencial teórico-conceitual) possibilitou a construção da abordagem metodológica da tese, tanto em etapas de pesquisa, quanto nas análises. Isso incluiu, por exemplo, fatores como a escolha dos projetos do referencial empírico, as condições para a realização dos experimentos de projeto, as disciplinas a serem analisadas, e a estruturação do modelo de diretrizes metodológicas.

Os processos de projeto analisados e submetidos à confirmação da hipótese, presentes nos capítulos 2 e 3, contaram com categorias de objetos arquitetônicos com uma diversidade de escalas, orçamentos, composição das colaborativas e tempo de experiência. Essa variabilidade de situações contribuiu para entender como o processo de projeto paramétrico colaborativo pode ser peculiar em relação aos demais. Sem a compreensão dessas condições diversas, as conclusões aqui tiradas poderiam referir-se a um estrato de resultados muito limitado. Assim, foram analisados, qualitativamente, como cada uma dessas condições, as quais carregavam particularidades, acarretaram evidências para responder à hipótese proposta.

Os referenciais empíricos diferem dos experimentos de projeto em diversos aspectos, mas pode-se afirmar que de entre as principais evidências estão: 1) o **alto tempo dedicado à experimentação projetual** e 2) a **experiência anterior** da equipe com **ferramentas paramétricas** e 3) a diversidade dos **processos construtivos e materiais** utilizados. Essas condicionantes interferiram significativamente para a confirmação da hipótese.

Apesar dessas circunstâncias parecerem muito significativas para a pesquisa, não puderam estar presentes nos experimentos de projeto por dois motivos. O primeiro, devido à falta de disponibilidade dos participantes dos experimentos, e o último, em razão da escassez de participantes. Desse modo, como já mencionado, as duas abordagens foram complementares entre si, permitindo tanto a coleta de informações que se revelaram valiosas, e que estão presentes nos discursos dos projetistas, quanto a observação direta de processos de projeto de menor volume de construção.

Entre as vantagens, obtidas a partir da observação direta dos experimentos, estiveram o acompanhamento da atividade de todos os profissionais das equipes em tempo real, o que possibilitou o mapeamento das ações projetuais adotadas. Esse mapeamento subsidiou a comparação entre processos de projeto de categorias específicas (CP1, CP2 e CE1), e alimentaram a criação do modelo inicial de diretrizes metodológicas. As ações da engenharia estrutural, como a criação de modelo estrutural e a análise estrutural paramétrica, integradas às ações tomadas por arquitetos, condicionaram a forma arquitetônica e evitaram demandas de compatibilização nas etapas projetuais posteriores.

Elas fizeram com que os arquitetos abandonassem as ideias inviáveis construtivamente, desde as fases mais precoces de concepção projetual. Outra constatação importante foi a identificação do **momento em que as equipes começam a expressar o pensamento matemático e algorítmico** (predominantemente na Definição do partido arquitetônico).

Em projetos paramétricos de orçamentos mais reduzidos, como o caso dos desenvolvidos no âmbito dos experimentos 01 e 02, o conhecimento do material desde a fase inicial foi imprescindível para a condução do processo, reforçando a hipótese de que a percepção da construtibilidade contribui para o projeto paramétrico. Qualquer imprevisão do material, nesses casos, poderia ter gerado inviabilidade construtiva, seja pela falta de materiais, seja pela escassez de mão-de-obra especializada.

Os capítulos 2 e 3 serviram para a confirmação da **hipótese**, no sentido em que a percepção da construtibilidade, quando priorizada desde as fases iniciais por equipes colaborativas, contribuiu para o projeto paramétrico, e fez com que os aspectos construtivos se integrassem à modelagem e consequentemente facilitaram a materialização do edifício. Posto isto, essas evidências foram confirmadas em 10 dos 11 processos analisados.

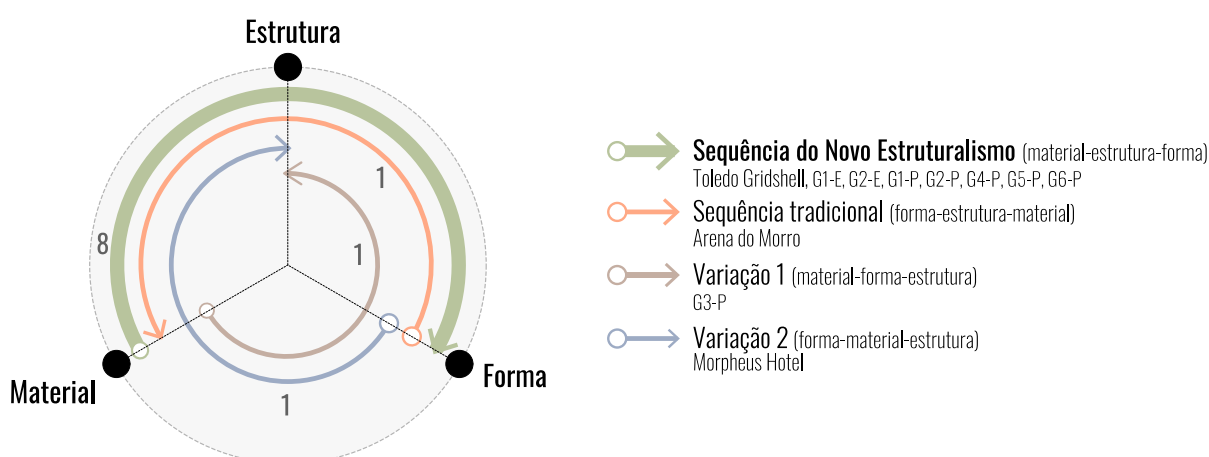
Retomando o que defende os Oxman (2010, p.15), analisamos como os 11 processos de projeto adotaram a sequência material-estrutura-forma (Figura 156). É importante constatar que os oito processos de projeto dos experimentos foram forçados a ter como ponto de partida o material, uma vez que era uma das restrições de projeto impostas para o início da concepção.

Do total, oito (de onze) equipes de projetistas confirmaram o que defendem os autores, adotando a sequência material-estrutura-forma. A Arena do Morro adotou um processo mais relacionado à sequência tradicional (forma-material-estrutura), uma vez que sua forma foi concebida inicialmente para acomodar o uso da madeira nas paredes. Mantendo a forma, os projetistas substituíram a madeira pelo concreto, que depois foi dimensionado para ser estruturado na geometria proposta.

Variações aos modelos do Novo Estruturalismo e à sequência dita tradicional foram encontradas. O grupo G3-P, do experimento 1, conhecendo previamente o material, partiu para definir a forma arquitetônica, para somente depois pensar em como ela poderia ser

estruturada. Isso fez com que tivessem problemas nas etapas finais, sobretudo no ajuste da viabilidade estrutural da forma que propuseram. Enquadraram-se, portanto, na Variação 1 (material-forma-estrutura). Ao analisar as publicações do escritório ZHA, percebe-se que o Morpheus Hotel concebeu primeiro a forma (ao definir uma geometria perfurada), determinou o material do seu exoesqueleto e partiu para as soluções estruturais. Assim, foi enquadrado na Variação 2 (forma-material-estrutura).

Figura 156 – Sequência de definição do material, da estrutura e da forma nos processos de projeto.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados coletados nos estudos empíricos e nos experimentos de projeto, a partir dos conceitos do Novo Estruturalismo, defendido por Oxman e Oxman (2010, pp.15-24).

Os resultados analisados em cada capítulo levaram a constatar que **a combinação do conhecimento das técnicas e dos métodos construtivos associados à modelagem paramétrica foi o fator de maior relevância para a confirmação da hipótese**. É pois, importante observar, que mesmo atendendo à hipótese, as limitações geradas pelo receio da inviabilidade construtiva, somadas à baixa competência em multimeios e multidomínios, como indicado por Lebahar (1999, p.45), são fatores que podem limitar a complexidade formal arquitetônica, como observado no projeto desenvolvido por uma das equipes (G6-P).

As categorias analíticas propostas foram: a) **problema de projeto** (pesquisa para embasar para uma melhor compreensão do problema de projeto); b) **construtibilidade** (contexto da aplicação dos conhecimentos em processos construtivos); c) **projeto colaborativo** (características observadas ao projetar em equipe); e d) **meios de concepção** (aplicação de ferramentas para embasar a concepção do projeto). Listamos, a seguir, resultados importantes intrínsecos a cada uma delas.

Consequentemente, para a categoria **problema de projeto**, todos os processos de projeto analisados demonstraram uma forte relação entre a restrição formal e a construtiva, mesmo que essa predominância de restrições não tenha acontecido no início do processo. Os projetos de menor escala construtiva não apresentaram restrições legais nem funcionais rigorosas, o que tornou as restrições formal e construtiva as mais significativas. Contudo, mesmo quando a legislação e os programas arquitetônicos foram mais desafiantes, as restrições formal e construtiva predominaram. Isso mostrou que, independentemente da condição inicial posta a um grupo de projetistas, as discussões sobre a forma e a viabilidade construtiva de projetos paramétrico demonstraram ser predominantes.

Ao invés, na categoria **construtibilidade**, a *expertise* dos projetistas em processos construtivos ocasionou uma concepção arquitetônica mais sistematizada, com menos conflitos e impasses. Isso significa dizer que as restrições construtivas devem ser constantemente analisadas desde as fases iniciais. Cabe destacar que experiência em construtibilidade deve ser holística, contemplando vários materiais e técnicas, mais do que de uma vasta experimentação com uma única técnica construtiva específica. Os resultados mostraram que essa experiência plural contribuiu mais do que o conhecimento aprofundado em uma técnica construtiva isolada.

Já no que diz respeito à categoria **projeto colaborativo**, há que destacar três aspectos podem ser destacados: 1) a diversificação das equipes; 2) as circunstâncias em que ocorrem a colaboração efetiva Kvan (2000, p. 413); e 3) condições de alternância entre momentos de liderança horizontal e vertical (MÜLLER *et al.*, 2018, p.84). O estudo apontou que a multidisciplinaridade defendida por Oxman e Oxman (2010) deve acontecer, sobretudo, na relação entre arquitetura e estrutura, as quais devem dialogar desde as fases iniciais. A colaboração efetiva, defendida por Kvan (2000, p. 413), apareceu em todos os processos analisados. Segundo este autor, este fenômeno acontece com a alternância entre colaboração e cooperação. Pelo que se induz que pode acontecer independentemente da frequência com que ocorre. No caso dos projetos em que a colaboração foi mais frequente, a liderança tende a ser mais horizontalizada, e quando menos frequente, maior a tendência

para uma liderança vertical. Esse dinamismo das trocas de liderança das equipes variaram conforme o perfil dos participantes, como previsto por Müller *et al.* (2018, p. 85).

Em todos os processos de projeto analisados estiveram presentes as chamadas soluções *in-house*, aquelas em que existem arquitetos na equipe que dominam ferramentas paramétricas, conforme classificação dada por Celani e Lenz (2014). Como a publicação foi realizada 7 anos antes da apresentação desta tese, é possível que a implementação paulatina nas escolas de arquitetura venha formando um número cada vez maior de arquitetos com o domínio de ferramentas paramétricas, minimizando assim a contratação de consultorias especializadas, ou de indústrias que ofertam o serviço. Estas duas últimas opções, no entanto, devem continuar a existir quanto maior for a complexidade dos projetos.

Por fim, na categoria **meios de concepção**, enfatiza-se que os projetos que tiveram a hipótese confirmada foram os que exploraram os diversos recursos de concepção, destacando-se a inclusão de recursos tradicionalmente conhecidos (como o croqui e os protótipos) ao fluxo digital de trabalho (*digital workflow*). É possível observar, que em dois dos processos de projeto (Toledo Gridshell e G5-P), a interrelação entre determinados comportamentos de formas e forças, convertidas em regras geométricas, como indicados por Ahlquist e Menges (2011, p.19), levaram à integração total do material e a promover respostas que a geometria poderia alcançar.

Com efeito, o alto orçamento da Arena do Morro e do Morpheus Hotel permitiu o vasto uso de *mock-ups*, apesar de usualmente serem financeiramente custosos. Todavia, podem ser simplificados e feitos com baixo custo para testar a parte da materialidade do edifício, como observado nos experimentos de projeto, proporcionando desta maneira o esclarecimento de eventuais dúvidas construtivas, sobretudo as relacionadas ao **comportamento físico do material e a sua relação com a geometria**. Recapitulando o que constata Pottman (2010, p. 74), em sua publicação sobre Geometria Arquitetônica, percebeu-se que é necessário um entendimento ainda mais profundo da geometria para perceber a sua aplicação em tecnologias de construção e de fabricação.

A geometria teve, portanto, um papel determinante no processo de pensamento e no desenvolvimento de soluções, uma vez que a relação entre as partes e o todo, tão

importante em projetos paramétricos, exige conhecimento e proficiência nessa área do conhecimento da matemática. Ao pensar continuamente na relação entre as partes e o todo, os processos de projeto indicaram um diálogo indissociável entre os encaixes estruturais e o todo arquitetônico.

A relação entre o material e a geometria reitera a importância do uso da prototipagem e de interações rápidas, indicados por Resnick (2017, p. 126) como elementos importantes para a exploração de possibilidades projetuais que impulsionam a criatividade.

Isso nos faz remeter à importância das competências multimeios e multidomínios no processo de projeto em geral. Seja ele paramétrico ou não, conforme defendidas por Lebahar (1999, p.45) como requisito um decisivo para os projetistas. Acrescentamos ainda que, devido à complexidade de uso das ferramentas paramétricas, e de sua associação à construtibilidade, essas competências devem estar ainda mais presentes. No âmbito educacional, estas competências devem ser estimuladas durante a formação dos jovens projetistas, sejam eles arquitetos, *designers* ou engenheiros civis. As instituições de ensino devem dar condições de infraestrutura, como acontece na FA/ULisboa, além de estímulos no processo de ensino-aprendizagem, para que estudantes despertem para a importância da inclusão de protótipos, sejam eles analógicos ou digitais, no seu fluxo de trabalho digital. Isso permitirá solucionar futuras inconsistências na construtibilidade do edifício.

O modelo de diretrizes metodológicas proposto no capítulo 4 condensa todos os quesitos analisados e trazidos para essa discussão, com o acréscimo de aspectos pontuados pelo júri, no exame de pré-defesa da tese, e pelos especialistas que colaboraram com a validação do modelo inicialmente proposto. Sendo assim, reforçamos aqui que a construção do modelo recebeu contributos nas diversas etapas da pesquisa, como do Referencial teórico-conceitual, do Referencial Empírico, dos Experimentos de projeto, e do Painel de especialistas. Destacamos, por último, no Quadro 16, de que etapa da pesquisa originaram-se os principais elementos e contributos presentes no modelo final de diretrizes metodológicas.

Quadro 16 – Relação dos principais elementos e contributos para a construção do modelo de diretrizes metodológicas final.

ETAPAS DA PESQUISA	PRINCIPAIS ELEMENTOS E CONTRIBUTOS PARA O MODELO FINAL
Referencial teórico-conceitual (etapa 1)	• Estrutura do ciclo de análise, síntese, simulação e avaliação (ACHTEN, 2009; KALAY, 2004; e LAWSON, 2011); • Modelo de colaboração de Chiu (2002, p.206); • Conceitos de restrições projetuais Lawson (2011);
Referencial empírico (etapa 2)	• Compreensão das dinâmicas colaborativas; • Ferramentas computacionais, modelos físicos e <i>mock-ups</i> integrados aos processos de projeto; • Dinâmica orçamentária; • Escala dos projetos.
Experimentos de projeto (etapa 3)	• Mapeamento de ações projetuais das equipes colaborativas; • Compreensão das dinâmicas de concepção colaborativas; • Peculiaridades presentes nas equipes de profissionais e estudantes; • Separação das etapas de capacitação e concepção;
Validação Pannel de especialistas (etapa 5)	• Melhor representação das ações projetuais como tarefas cíclicas; • Reformulação na codificação das ações projetuais; • Revisão da categorização (transitória ou recorrente) de algumas ações projetuais; • Compreensão da relevância de cada uma das ações projetuais presentes, através do estabelecimento de pesos.

A complexidade que envolveu a elaboração do modelo de diretrizes pode restringir a sua aplicação a determinados tipos e portes de projetos, como explanado anteriormente, mas a sua confiabilidade pode ser atestada em razão de ter sido submetido a um conjunto de etapas, com ampla diversidade metodológica.

Conclusões

Os paradigmas que envolvem a concepção arquitetônica e que incluem o uso de algoritmos e códigos, em que as equipes colaborativas projetam o comportamento (GRAMAZIO; KOHLER, 2008c, p.181), trouxe consigo inevitáveis dilemas, de cunho teórico e prático, com destaque para a sua relação com a dimensão material.

Conforme já observado por Resnick (2017, p. 125), projetistas que são bons exploradores (*thinkers*) “aproveitam o lado bom do inesperado; usam experiências pessoais; e usam materiais familiares de maneiras não familiares”. Ao longo das etapas desenvolvidas na tese, observou-se que esses três aspectos genéricos se aplicam muito bem ao contexto de projetos paramétricos.

Esta tese buscou apresentar diversos contextos da aplicação desses tipos de projeto, e procurou complementar os estudos precedentes, preenchendo uma lacuna de

pesquisa/investigação existente. Por ter um universo de pesquisa amplo, envolvendo a perspectiva acadêmica e a profissional, levou a expor as fragilidades e as potencialidades de cada um, conforme apontado no item Síntese dos resultados.

Ao se revisitar os quatro **objetivos** específicos lançados no início da tese, verificamos que resultados significativos foram trazidos à luz, com devido enquadramento em trabalhos científicos anteriores.

Ao **pesquisar o impacto da adoção de restrições construtivas e de fabricação, de cada material, nas fases iniciais do processo de projeto paramétrico**, pudemos extrair resultados das diferentes etapas propostas na tese. No item 1.2 (Materialidade e Construtibilidade), do referencial teórico-metodológico, foi possível resgatar o estado da arte na relação entre o meio físico e o digital, sobretudo no tocante a projetos paramétricos. Nos estudos empíricos, ficou clara a íntima relação entre as propriedades físicas como mecanismos importantes para a tomada de decisões, limitando e condicionando os projetistas desde as etapas iniciais da concepção projetual.

Nos experimentos de projeto realizados, pudemos perceber o impacto direto de determinadas ações projetuais, como a análise de viabilidade construtiva e o estudo de materialidade, que mostraram uma indissociável relação entre o físico e o digital. De uma maneira geral, pôde-se perceber em todos os processos de projeto analisados a vocação dos materiais (metal, concreto e madeira), e os métodos construtivos próprios de cada um deles, puderam ser convertidos em soluções geométricas específicas.

Ressaltamos aqui a indissociável relação entre as regras de associação matemática e geométrica o comportamento dos materiais, já destacados por Ahlquist e Menges (2011, p.19) como meio de interligar a geometria a processos construtivos adotados nos processos de projeto. Essa relação deve ser mediada por fluxos digitais de trabalho que incluam o meio físico e digital de maneira contínua, como uma extensão do que defendem Gramazio e Kohler (2008b, p.7), em seu conceito de materialidade digital.

Essa relação foi possível através da combinação entre o conhecimento dos projetistas e a exploração de diferentes meios de concepção, tal qual defendido por Laing (2019, s.n), quando afirma que “a introdução de ferramentas digitais deve ser vista como

complementar ao de abordagens tradicionais, ao invés de ser percebida como um caminho alternativo”.

Os desenhos e os modelos físicos passam a ter um novo significado no processo de projeto quando combinados com o uso das ferramentas paramétricas. Dessa maneira, o desenho permanece sendo uma ferramenta essencial para a arquitetura, estabelecendo, segundo Scheer (2014, p.3), “ligação entre pensamento, projeto e construção”.

Assim, ferramentas analógicas e digitais se complementam constantemente, subsidiando as tomadas de decisões mais fluidamente e elevando o potencial de incorporação da construtibilidade aos objetos arquitetônicos. Dessa maneira, a interação entre o digital e o material cria novas relações entre arquiteto, projeto e construção, como aponta Scheer (2014, p.49).

Na mesma direção do que é defendido por alguns autores (GRAMAZIO e KOHLER, 2008c; LAING, 2019; SCHEER, 2014) os resultados desta tese apontaram para a importância do hibridismo dos meios de concepção e de representação do projeto paramétrico colaborativo, que dependem de projetistas que possuam habilidades em multimeios e multidomínios, conforme assinala Lebahar (1999, p.45).

Destacamos a importância do *mock-up* como mecanismo decisório para os projetistas, pela sua forte relação com a definição de detalhes construtivos, que são parte crucial da digitalização do processo construtivo contemporâneo. Cabe aqui ressaltar que o detalhamento arquitetônico é um produto essencial na relação do projeto com a indústria, conforme apontado por Marble (2012, p.9), pois é peça fundamental para a viabilidade construtiva de um projeto, sobretudo aqueles que fogem ao padrão construtivo dito tradicional. Realidade que ocorre frequentemente quando a arquitetura é concebida com recurso às ferramentas paramétricas. Os níveis de customização das soluções construtivas observadas nos projetos leva-nos a indicar que os detalhes construtivos, ou pormenorizações construtivas, passam a ter a necessidade de serem representados em escalas maiores, tanto para potencializar o poder de decisão dos projetistas, como para proporcionar uma melhor comunicação com a indústria da construção civil. Detalhes desenhados ou prototipados em escala 1:1 ou 1:2 passam a ser muito mais recorrentes e aplicáveis do que em projetos que são concebidos com geometrias mais regulares

(normalmente desenvolvidos em BIM ou em desenhos bidimensionais), que comumente aplicam escalas de 1:5, 1:10, ou 1:20.

Na busca por **analisar a contribuição de equipes colaborativas de arquitetos, engenheiros calculistas e construtores/fabricadores para uma melhor inserção da construtibilidade no processo de projeto paramétrico**, descobrimos, sobretudo com a realização dos experimentos de projeto, que o trabalho em equipe, em caráter multidisciplinar, pode alterar significativamente os processos e os produtos projetuais arquitetônicos. Além disso, os perfis de liderança das equipes colaborativas, sejam eles vertical ou horizontal, mostraram diferentes modos de interação entre profissionais e estudantes, proporcionando benefícios e entraves ao processo de projeto.

No campo profissional, as potencialidades da integração multidisciplinar ajudaram a preencher lacunas do processo criativo em arquitetura. Isso mostra que esse tipo de colaboração deve ser cada vez mais encorajada e deve partir dos arquitetos. Eles devem tomar a iniciativa de exigir uma composição multidisciplinar colaborativa desde as primeiras ideias. Esses profissionais devem passar a enxergar os projetos paramétricos como processos que exigem, antes de tudo, autoria coletiva, que de acordo com Marble (2012, p.8), exige a substituição de processos tradicionais por “fluxos de projeto conduzidos por algoritmos profundamente ligados a uma infraestrutura de comunicação digital coletiva”. A incorporação da construtibilidade nesses processos de projetos depende dessas trocas de conhecimento, mediadas pelas potencialidades do computador, mas também exige uma mudança na prática projetual contemporânea, que passa a incluir constantes integrações dos projetistas com universidades e pesquisadores, conforme destacam Hensel e Nilsson (2019, p.6).

No âmbito acadêmico, os desafios da colaboração multidisciplinar são mais significativos. A falta de experiência em processos construtivos, o tempo limitado para a formação e a dificuldade de integração entre diferentes os departamentos (arquitetura, engenharia civil, engenharia mecânica, indústria), ainda representarão um obstáculo para o avanço dos processos criativos que integrem a construtibilidade e o meio computacional.

O objetivo de **avaliar como as restrições construtivas se integram à modelagem paramétrica durante a projeção**, foi alcançado com a realização das etapas Referencial Teórico-Conceitual, Referencial Empírico e Experimentos de Projeto.

Em entrevistas realizadas com especialistas da prática, como Peter Mehrrens, Marc Simmons e Arnold Walz, respectivamente publicadas por Celani et al. (2015), Celani (2018) e Sedrez e Celani (2014), são apontados casos em que a indústria adota a modelagem/modelação paramétrica como ferramenta crucial para estabelecer a ponte entre o processo criativo em arquitetura e a sua fabricação, uma vez que executar formas arquitetônicas complexas, aplicando processos convencionais de construção, levariam à inviabilidade do projeto.

Ainda tratando do mesmo objetivo específico, as referências empíricas mostraram como as ferramentas paramétricas foram utilizadas em prol da viabilização e encurtamento do tempo investido no projeto e execução. No caso mais emblemático (em termos de porte) de integração entre a modelagem/modelação paramétrica e o processo de fabricação, o do Morpheus Hotel, não haveria a possibilidade de executar um projeto de tal magnitude em tão pouco tempo. Caso não existisse a possibilidade de otimização desses processos por meio da integração entre restrições construtivas e modelagem/modelação paramétrica, o projeto poderia ter sido simplificado, e perdido as suas características iniciais.

Para **sintetizar diretrizes metodológicas para projetos paramétricos focados na construtibilidade**, foi necessário construir um modelo inicial, subsidiado pelas etapas anteriores da pesquisa/investigação, e posteriormente validado através do crivo de oito especialistas, entre brasileiros e portugueses.

As diretrizes partiram das ações projetuais mapeadas nos experimentos de projeto. Caso os experimentos tivessem sido mais complexos, a exemplo de projetos como a Arena do Morro ou do Morpheus Hotel, provavelmente haveria a necessidade de envolver mais especialidades, e conseqüentemente, envolveria equipes grandes, multidisciplinares e altamente especializadas, conforme apontado por Marble (2012, p.10). Adicionalmente, o tempo de capacitação nas ferramentas teria de ser maior, por envolver programas maiores e projetos mais complexos, como simulações de comportamento térmico, acústico,

luminotécnico. Isso exigiria mais tempo de execução, e engajamento por parte dos envolvidos.

Em contrapartida, portes maiores poderiam conduzir os projetistas a maiores níveis de experimentação nas maneiras de projetar, defendido por Achten (2009, pp. 507-530) como algo valioso e peculiar para cada realidade encontrada pelos projetistas. A aplicação de experimentações alinham-se ao que indica Resnick (2017, p. 126), quando aponta a importância das mudanças e revisões constantes como algo que contribui para o processo criativo.

Ainda na discussão acerca da escala dos processos de projeto estudados, perguntamo-nos: até que ponto as diferentes ferramentas podem ser aplicadas às diferentes escalas? Vimos que, independentemente da escala do projeto, a complexidade construtiva pode definir os tipos de ferramenta mais adequadas. O maior exemplo foi o Morpheus Hotel, que apesar do seu grande porte, aplicou praticamente as mesmas ferramentas dos projetos mais simples dos experimentos. Nesses casos, os resultados corroboram com o que afirma Scheurer (2012, p.111), ao referir-se às ferramentas computacionais padrão como geradoras de projetos convencionais, que não é necessariamente a intenção de projetistas que aplicam ferramentas paramétricas.

Ao cumprir todos os objetivos lançados na etapa inicial da tese, através de uma abordagem metodológica plural, pôde-se explorar a inclusão da construtibilidade nos processos de projeto paramétrico colaborativo de modo aprofundado, trazendo importantes contributos para a área.

Os principais **contributos** desta tese envolvem dois âmbitos. O primeiro, que trata da ampla discussão acerca das condições nas quais os processos de projeto paramétricos ocorrem, e sua íntima relação com a construtibilidade. Isso exigiu o trânsito em diversas áreas do conhecimento ligadas ao projeto, como a de métodos construtivos tradicionais e digitais, as especificidades da aplicação de ferramentas paramétricas no processo de projeto e a integração de *expertise* de projetistas de diversas formações e nacionalidades.

O segundo principal contributo foi a indicação de um modelo de diretrizes metodológicas para projetos paramétricos colaborativos com ênfase na construtibilidade. Centrado em interações colaborativas multidisciplinares, o modelo proposto possibilita a

percepção da dinâmica desses projetos por meio de ações projetuais específicas que têm poder decisório nos processos de projeto paramétricos, sobretudo quando aplicado a projetos de menor escala.

O modelo pode servir de guia os para estudantes e os profissionais que projetem com ferramentas paramétricas, apesar de serem pouco adotadas por arquitetos, sobretudo no Brasil. Assim, espera-se que o modelo proposto ajude a tornar os projetos paramétricos mais desmistificados na prática e academia, quando compreendida a sua forte integração à construtibilidade do objeto arquitetônico.

O modelo proposto poderá alcançar as escolas de arquitetura, tanto em nível de graduação, quanto em nível de pós-graduação, no âmbito de mestrados profissionais. Na formação mais basilar, contribuirá mostrando aos arquitetos em formação o peso de abordagens que valorizam princípios de colaboração, aplicação avançada da geometria à arquitetura, experimentações que incorporem o uso de protótipos e o aprofundamento em tecnologias construtivas. Já para a formação nos mestrados profissionais, pode contribuir com a ressignificação de processos colaborativos, assim como na imersão em novas tecnologias digitais de projeto.

Com a implementação paulatina do modelo proposto por estudantes e profissionais, a indústria da AEC terá um ambiente mais fértil para difundir a implementação de projetos paramétricos, que pode começar a mudar o paradigma da produção arquitetônica, eliminando o estigma de que projetos paramétricos são normalmente intangíveis e apenas concebidos por grandes escritórios de arquitetura. Quanto tempo esta mudança pode levar? O que esperar para o futuro? Apesar de ser uma pergunta difícil de responder, um dos caminhos possíveis pode estar relacionado ao uso de um modelo que possa alcançar de maneira eficaz o ensino e a indústria por meio da concepção de objetos arquitetônicos de pequeno porte.

Limitações e desafios para trabalhos futuros

As principais limitações encontradas ao longo do desenvolvimento desta tese referem-se às etapas de coleta de dados, nomeadamente presentes no referencial empírico

(etapa 2), experimentos de projeto (etapa 3) e na validação do modelo de diretrizes metodológicas pelo painel de especialistas (etapa 5).

Os processos de projeto analisados no referencial empírico dependeram da coleta de publicações e entrevistas, tendo algumas delas demorado a ser respondidas. Analisar processos de projeto de obras já executadas apresentou uma limitação intrínseca: a maneira de coletar as informações dependeu exclusivamente do relato dos projetistas, e pôde estar sujeita a eventuais distorções. Por outro lado, a observação desses processos em tempo real pode levar anos, se considerarmos projetos de médio e grande porte, a exemplo do que foi feito por Hudson (2010) em sua tese de doutorado/doutoramento.

Como etapa complementar, foi possível realizar experimentos, em projetos de menor volume construído, que possibilitaram o acompanhamento dos processos em tempo real. Entretanto, essa etapa apresentou limitações como o curto tempo de execução, a pouca disponibilidade de tempo de alguns participantes, a falta de capacitação e experiência prévia com ferramentas paramétricas (que exigiu etapas preliminares de capacitação) e a pouca cultura de colaboração existente entre os participantes. Outro fator limitante foi a falta de recursos orçamentários, que interferiu na compra de licenças de *softwares*, na produção de modelos físicos e *mock-ups*, e na aplicação da fabricação digital como estratégia de integração entre o projeto e a execução/fabricação.

O método *Delphi*, escolhido para validar o modelo de diretrizes metodológicas proposto na tese, mostrou-se desafiador, pois foi realizado durante a pandemia da COVID-19 (*CoronaVirus Disease-2019*). Isso fez com que a dupla consulta feita aos especialistas levasse mais tempo que o previsto, em razão da sobrecarga de suas variadas atribuições, em tempos de ensino remoto.

Para trabalhos futuros, abre-se a possibilidade de explorar pesquisas/investigações direcionadas aos diferentes tipos e portes/escalas dos objetos arquitetônicos estudados nesta tese. Essas pesquisas podem apontar diferentes roupagens para o modelo de diretrizes proposto, que pode ser adaptado, flexibilizado ou incrementado.

A colaboração multidisciplinar, em âmbito digital, pode ser explorada de modo mais aprofundado em momentos de pandemia, o que potencializou o fenômeno do trabalho

remoto e colaborativo. Nesse sentido, os ateliês virtuais de projeto paramétrico colaborativo podem apresentar limitações e potenciais ainda pouco explorados.

Para trabalhos futuros, envolvendo o âmbito profissional, sugere-se que sejam realizados novos experimentos de projeto que integrem profissionais da indústria às equipes de projeto. Isso pode ser facilitado devido ao advento do trabalho remoto, que pode incluir profissionais de outras localidades. No tocante ao âmbito acadêmico, trabalhar remotamente possibilita a realização de experimentos que podem ser desenvolvidos envolvendo estudantes de diversos departamentos, de localidades distintas. Isso pode viabilizar a composição de equipes colaborativas diversas, potencializando os resultados de colaboração já no período da formação dos projetistas.

Ainda no que diz respeito aos experimentos, trabalhos futuros podem:

- Explorar o uso de diferentes ferramentas paramétricas durante a capacitação, como o SolidWorks, o Generative Components, o Revit/Dynamo, ou outros que venham a surgir no mercado;
- Não fornecer os materiais antecipadamente, se as sequências adotadas pelos grupos de projetistas se aproximarem do que é defendido pelos Oxman (2010, p.15) no manifesto do Novo Estruturalismo (material-estrutura-forma);
- Variar o número de projetistas dos grupos colaborativos;
- Incluir a participação de arquitetos recém-formados que já tenham proficiência em ferramentas paramétricas, adquiridas durante o seu período de graduação.

Por fim, sugerimos que novos estudos tentem investir mais tempo na capacitação dos profissionais e estudantes na plataforma BIM, apesar do grande esforço que isto possa representar para a capacitação de arquitetos e/ou estudantes. Desse modo, seria possível testar *add-ons* como o VisualARQ já no ato da concepção. Esse tipo de integração poderá permitir a concepção paramétrica ao mesmo tempo em que se criam elementos arquitetônicos com propriedades BIM. Essa integração traz a vantagem da criação de elementos complexos que podem ser convertidos para o formato interoperável IFC

(*Industry Foundation Classes*)¹², ao mesmo tempo em que mantém os projetistas na interface do *software* nativo da modelagem paramétrica.

¹² Termo extraído de Sedrez e Gauss (2010, p. 162).

REFERÊNCIAS

ACHTEN, H. Requirements for Collaborative Design in Architecture. In: H. Timmermans (Org.); Sixth Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning - Part one: Architecture Proceedings Avegoor, the Netherlands. **Anais...**, 2002.

ACHTEN, H. Experimental Design Methods – A Review. **International Journal of Architectural Computing**, v. 07, n. 04, p. 505–534, 2009.

AGKATHIDIS, A. **Generative Design**. London: Laurence King Publishing Ltd, 2015.

AHLQUIST, S.; MENGES, A. Introduction: Computational Design Thinking. In: A. Menges; S. Ahlquist (Orgs.); **Computational Design Thinking**. p.10–20, 2011. London: Wiley.

AISH, R. First build your tools. **Inside SmartGeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design**. p.35–47, 2013. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

ANDRADE, M.; RUSCHEL, R.; MOREIRA, D. O processo e os métodos. In: D. C. C. K. Kowaltowski; D. de C. Moreira; J. R. D. Petreche; M. M. Fabrício (Orgs.); **O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia**. p.80–99, 2011. São Paulo: Oficina de textos.

ARAÚJO, A. L. DE. **Complexidade e Emergência**, 2017. Campinas: Tese (Doutorado em Arquitetura)-Unicamp.

AUSTERN, G.; CAPELUTO, I. G.; GROBMAN, Y. J. Rationalization methods in computer aided fabrication: A critical review. **Automation in Construction**, v. 90, n. March, p. 281–293, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.027>>. .

BANIHASHEMI, S.; TABADKANI, A.; HOSSEINI, M. R. Modular Coordination-based Generative Algorithm to Optimize Construction Waste. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 631–639, 2017. The Author(s). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.222>>. .

BEORKREM, C. **Material Strategies in Digital Fabrication**. New York and Abingdon: Routledge, 2013.

BERNSTEIN, P. G. Thinking versus making: remediating design practice in the age of digital representation. In: B. Kolarevic; K. R. Klinger (Orgs.); **Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture**, 2008. New York: Routledge.

BETTMANN/CORBIS. Frei Otto's Airborne Architecture. Disponível em: <<https://www.nybooks.com/daily/2015/05/06/pritzker-prize-frei-otto-airborne/>>. Acesso em: 24/6/2021.

- BHOOSHAN, S. Parametric design thinking: A case-study of practice-embedded architectural research. **Design Studies**, v. 52, p. 115–143, 2017. Elsevier Ltd.
- BILBAO, G. Guggenheim Bilbao. Disponível em: <<https://www.guggenheim-bilbao.eus/en/the-building>>. Acesso em: 21/6/2021.
- BOUDON, P.; POUSIN, F.; DESHAYES, P.; SCHATZ, F. **Enseigner La Conception Architecturale – Cours D’architecturologie**. Paris: Éditions de la Villett, 2000.
- BURRY, J.; BURRY, M. **The New Mathematics of Architecture**. 1ª ed. London: Thames & Hudson, 2010.
- BURRY, M. Geometry working beyond effect. **Architectural Design**, v. 81, n. 4, p. 80–89, 2011.
- CAETANO, I.; SANTOS, L.; LEITÃO, A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, n. 2, p. 287–300, 2020.
- CARPO, M. **The second digital turn: design beyond intelligence**. London: The MIT Press, 2017.
- CARVALHO, G. **Ambientes cognitivos para projeção: um estudo relacional entre as mídias tradicional e digital na concepção do projeto arquitetônico**, 2004. Recife, Brasil: Universidade Federal de Pernambuco.
- CELANI, G. Uma nova era para a arquitetura. In: G. Celani; M. Sedrez (Orgs.); **Arquitetura Contemporânea e Automação: prática e reflexão**2. p.17–20, 2017. São Paulo: ProBooks.
- CELANI, G. Fachadas: Detalhamento construtivo na arquitetura contemporânea (parte 1). Entrevistado: Marc Simmons. **Portal Vitruvius - Entrevista**, ano 19, nov. 2018. Disponível em: <<https://vitruvius.com.br/revistas/read/entrevista/18.076/7159?page=1>>. Acesso em: 19/4/2021.
- CELANI, G.; LENZ, D. Novas tecnologias na construção de edifícios: estabelecendo a ponte entre o processo criativo e a produção por controle numérico. **Cadernos PROARQ**, v. 1, n. 23, p. 138–151, 2014.
- CELANI, G.; NETO, W. B.; FRANCO, S. An interview with architect Peter Mehrrens. Entrevistado: Peter Mehrrens. **Portal Vitruvius - Entrevista**, ano 16, jul. 2015. Disponível em: <https://vitruvius.com.br/revistas/read/entrevista/16.063/5541/en_US?page=1>. Acesso em: 19/4/2021.
- CELANI, M. G. C.; VAZ, C. E. CAD scripting and visual parametric modeling environments: a comparison from a pedagogical point of view. **Cadernos PROARQ** 18, , n. 18, p. 177–194, 2012. Rio de Janeiro.
- CHIU, M.-L. An organizational view of design communication in design collaboration. **Design Studies**, v. 23, n. 2, p. 187–210, 2002.

- COLABELLA, S.; LANCIA, D.; REPOLA, L.; MEMMOLO, R. A monitoring system for wooden post-formed gridshells. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015. **Anais...** . p.1–10, 2015. Amsterdam.
- CORDEIRO, A. L. DE M.; ROCHA, G. C. Conceber arquitetura com modelos virtuais: a relevância dos sistemas estruturais. In: A. L. de M. Cordeiro; G. da C. Rocha (Orgs.); **Modelos em Arquitetura: Concepção e Documentação**. p.314, 2017. João Pessoa: Editora da UFPB.
- D'AMICO, B.; KERMANI, A.; ZHANG, H.; et al. Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure. **Structures**, v. 3, p. 227–235, 2015.
- DIESTE, E. Some reflections on architecture and construction. **Perspecta** 27, v. 27, p. 186–203, 1992. Cambridge. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2307/1567183>>. .
- DUARTE, J. P.; CELANI, G.; PUPO, R. Inserting Computational Technologies in Architectural Curricula. In: N. Gu; X. Wang (Orgs.); **Computational Design Methods and Technologies: Applications in CAD, CAM and CAE Education**. p.390–411, 2012. IGI Global.
- DUNN, N. **Digital Fabrication in Architecture**. London: Laurence King Publishing Ltd, 2012.
- EINSENMAN, P. Peter Einsenman Architects. Disponível em: <<https://eisenmanarchitects.com/Nunotani-Office-Building-1992>>. Acesso em: 24/6/2021.
- FA.U LISBOA. Apresentação Faculdade. Disponível em: <Apresentação Faculdade>. Acesso em: 25/6/2021.
- FABRÍCIO, M. M. O arquiteto e o coordenador de projetos. **Revista do programa de pós-graduação em arquitetura e urbanismo da faausp**, , n. 22, p. 26–50, 2007. São Carlos.
- FABRÍCIO, M. M.; MELHADO, S. B. Desafios Para Integração Do Processo De Projeto Na Construção De Edifícios. Workshop nacional: Gestão do Processo de Projeto na Construção de Edifícios. **Anais...** . p.1–11, 2001. São Carlos.
- FABRÍCIO, M. M.; MELHADO, S. B.; BERTEZINI, A. L. A formação do arquiteto e seu papel de líder na equipe de projetos. NUTAU 2006: Seminário Internacional Inovações Tecnológicas e Sustentabilidade & Workshop Brasileiro de Gestão do Processo de Projeto na Construção de Edifícios. **Anais...** , 2006. São Paulo: FAAUSP.
- FISCHER, T. Geometry Rationalization for Non-Standard Architecture. **Architecture Science.**, v. 5, n. 5, p. 25–47, 2012.
- FLORIO, W. Contribuições do Building Information Modeling no processo de projeto em arquitetura. III Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção Civil. **Anais...** , 2007. Porto Alegre.
- FLORIO, W. Modelagem Paramétrica, Criatividade E Projeto: Duas Experiências Com Estudantes De Arquitetura. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 6, n. 2, p. 43–66, 2012.

FRAMPTON, K. **Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture**. Cambridge and London: The MIT Press, 1996.

FRAMPTON, K. **História crítica da arquitetura moderna**. São Paulo: Martins Fontes, 1997.

FUGIER, M. A. The Morpheus Hotel: From Design to Production. Disponível em: <<https://vimeo.com/203509846>>. .

GALLAS, M.-A.; JACQUOT, K.; JANCART, S.; DELVAUX, F. Parametric Modeling: An Advanced Design Process for Architectural Education. Proceedings of the 33rd eCAADe Conference. **Anais...** . v. 2, p.149–157, 2015.

GONZÁLEZ, M. F. Hotel Morpheus / Zaha Hadid Architects. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/896433/morpheus-hotel-zaha-hadid-architects>>. .

GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. Towards a Digital Materiality. In: B. Kolarevic; K. R. Klinger (Orgs.); **Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture**. p.103–118, 2008a. New York: Routledge.

GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. Digital Materiality in Architecture: Bridging the Realms of the Virtual and Physical. In: R. Geiser (Org.); **Explorations in Architecture: Teaching, Design, Research**. p.179–199, 2008b. Basel: Birkhäuser.

GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. **Digital Materiality in Architecture**. Zurich: Lars Muller Publishings, 2008c.

GU, N.; OSTWALD, M. J. Computational methods and technologies: Reflections on their impact on design and education. **Computational Design Methods and Technologies: Applications in CAD, CAM and CAE Education**. p.412–419, 2012. IGI Global.

HENSEL, M. U.; NILSSON, F. Current changes in conditions and contexts for architectural research and practice. **The changing shape of architecture**. p.1–13, 2019. New York: Routledge.

HERZOG&DEMEURON. **Arena do Morro em Projeto e Construção**. Natal: Centro Sócio Pastoral de Mãe Luíza, 2014.

HUDSON, R. **Strategies for parametric design in architecture**. **Civil Engineering**, 2010. Cambridge, United States: Thesis (PhD in Architecture)-, Massachussets Institute of Technology.

IWAMOTO, L. **Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques**. New York: Princeton Architectural Press, 2009.

KALAY, Y. E. **Architecture's New Media: Principles, Theories, and Methods of Computer-Aided Design**. Cambridge (Mass.): MIT Press, 2004.

KASANEN, E.; LUKKA, K.; SIITONEN, A. The constructive approach in management accounting research. **Journal of Management Accounting Research**, v. 5, n. Fall 1993, p. 23, 1993.

KIFOKERIS, D.; XENIDIS, Y. Constructability: Outline of Past, Present, and Future Research. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 8, 2017.

KLEINSMANN, M. S. **Understanding collaborative design**, 2006. Delft, Holanda: Proefschrift Technische Universiteit Delft.

KLINGER, K. R. Relations: information exchange in designing and making architecture. In: B. Kolarevic; K. R. Klinger (Orgs.); **Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture**. p.25–36, 2008. New York: Routledge.

KOLAREVIC, B.; KLINGER, K. R. Manufacturing/material/effects. In: B. Kolarevic; K. R. Klinger (Orgs.); **Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture**. p.5–24, 2008. New York: Routledge.

KÓS, J. R. Projeto Digital. In: F. Braidá (Org.); **101 Conceitos de Arquitetura e Urbanismo na Era Digital**. 1º ed, p.256, 2016. São Paulo: ProBooks.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; MOREIRA, D. DE C.; PETRECHE, J. R. D.; FABRÍCIO, M. M. **O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

KUBICKI, S.; GUERRIERO, A. Cooperative design studios in education. Proceedings of the SIGraDi Conference. **Anais...**, 2009.

KULA, D.; TERNAUX, E.; HIRSINGER, Q. **Materiology: the creatives guide to materials and technologies**. Basel: Frame Publishers, 2014.

KVAN, T. Collaborative design: what is it? **Automation in Construction**, , n. 9, p. 409–415, 2000.

DE LA TOUR, D. B. Centre Pompidou-Metz / Shigeru Ban Architects. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/617797/centre-pompidou-metz-slash-shigeru-ban-architects>>..

LAING, R. **Digital Participation and collaboration in architectural design**. New York: Routledge, 2019.

LAWSON, B. **Como arquitetos e designers pensam**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

LEACH, N.; TURNBULL, D.; WILLIAMS, C. Introduction. **Digital Tectonics**. p.4–13, 2004. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

LEBAHAR, J. C. Analyse cognitive de la conception et de sa pédagogie. **Approche didactique de l'enseignement du projet en architecture**, 1999. Marselha: École d'Architecture de Marseille-Luminy.

LYNN, G.; KELLY, T. **Animate Form**. Princeton: Princeton Architectural Press, 1999.

- MANGELSDORF, W. Structuring Strategies for complex geometries. **Architectural Design**, v. 80, n. 4, p. 40–46, 2010. London.
- MARBLE, S. From process to workflow: designing design, designing assembly, designing industry. In: S. Marble (Org.); **Digital Workflows in architecture**, 2012. Basel: Birkhauser.
- MENDELSON, R. The Constructibility Review Process: A Constructor's Perspective. **Journal of Management Engineering**, v. 13, n. 3, p. 17–19, 1997.
- MENGES, A. Integral Formation and Materialization: computational form and material gestalt. In: A. Menges; S. Ahlquist (Orgs.); **Computational Design Thinking**. p.198–210, 2011. London: Wiley.
- MONTEIRO, V.; JANUÁRIO, P.; VELOSO, M. Design collaboration towards constructibility in parametric design process: a design experiment with architecture students. Proceedings of the 38th eCAADe. **Anais...**, 2020. Berlin.
- MONTEIRO, V.; VELOSO, M.; JANUÁRIO, P. Construtibilidade e parametrização em projetos colaborativos. **Revista Arquitectos**, v. ano 21, n. fev. 2021, 2021a. Disponível em: <<https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitectos/21.248/8004>>.
- MONTEIRO, V.; VELOSO, M.; JANUÁRIO, P. Constructability in parametric design process: the impact of collaboration between architects and civil engineers. In: M. do R. Monteiro; M. S. M. Kong (Orgs.); **Tradition and Innovation (PHI)**. CRC Press ed., p.566, 2021b. Porto.
- MÜLLER, R.; SANKARAN, S.; DROUIN, N.; et al. A theory framework for balancing vertical and horizontal leadership in projects. **International Journal of Project Management**, v. 36, n. 1, p. 83–94, 2018. Elsevier Ltd, APM and IPMA.
- NICKNAM, M.; BERNAL, M.; HAYMAKER, J. A Case Study in Teaching Construction of Building Design Spaces. Proceedings of the 30th eCAADe Conference. **Anais...** v. 2, p.595–604, 2013.
- NIMA, M. A. **Constructability factors in the malaysian construction industry**, 2001. Universiti Putra Malaysia.
- NOKES-MALACH, T. J.; MEADE, M. L.; MORROW, D. G. The effect of expertise on collaborative problem solving. **Thinking and Reasoning**, v. 18, n. 1, p. 32–58, 2012.
- O'BRIEN, W.; SOIBELMAN, L.; ELVIN, G. Collaborative design processes: An active- and reflective-learning course in multidisciplinary collaboration. **Journal of Construction Education**, v. 8, n. 2, p. 78–93, 2003.
- OSTWALD, M. J. Systems and enablers: Modeling the impact of contemporary computational methods and technologies on the design process. **Computational Design Methods and Technologies: Applications in CAD, CAM and CAE Education**. p.1–17, 2012. IGI Global.

OTHMAN, A. A. E. Improving Building Performance through Integrating Constructability in the Design Process. **Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal**, v. 3, n. 2, p. 333–347, 2011. Disponível em: <http://www.grad.unizg.hr/otmcj/clanci/vol3_is2/Clanak_6_OTMCJ_2_2011_web-5.pdf>. .

OVÍDIO, C.; VELOSO, M.; PEDRINI, A. A colaboração no projeto de edifícios para atender metas ambientais. **V!RUS Nomads**, , n. 18, p. 1–14, 2019.

OXMAN, N. **Material-based Design Computation**, 2010. Cambridge: Thesis (PhD in Architecture)-, Massachusetts Institute of Technology.

OXMAN, R.; GU, N. Theories and Models of Parametric Design Thinking. Proceedings of the 33rd eCAADe Conference. **Anais...** . v. 2, p.477–482, 2015. Wien.

OXMAN, RIVKA; OXMAN, ROBERT. Introduction-The new structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. **Architectural Design**, v. 80, n. 206, p. 14–23, 2010. London.

PEARCE, C. L. The future of leadership: Combining vertical and shared leadership to transform knowledge work. **Academy of Management Executive**, 2004.

PETERS, B.; PETERS, T. Introduction. **Inside SmartGeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design**. p.8–15, 2013. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

PICON, A. Architecture and the virtual: towards a new materiality. **Praxis: Journal of Writing+ Building**, , n. 6, p. 114–121, 2004.

PICON, A. Architecture and the Virtual: Towards a New Materiality. In: K. Sykes (Org.); **Constructing a New Agenda: Architectural Theory 1993-2009**. Kindle ed., 2010. New York: Princeton Architectural Press.

PICON, A. **The Materiality of Architecture**. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2020.

PINHEIRO, J.; FARIAS, T.; ABE-LIMA, J. Peinel de Especialistas e Estratégias Multimétodos: Reflexões, Exemplos, Perspectivas. **Psico**, v. 44, n. 2, p. 184–192, 2013.

PIÑÓN, H. **Curso Básico de Proyectos**. Barcelona: Edicions UPC, 1998.

PONE, SERGIO; COLABELLA, S.; D'AMICO, B.; et al. Timber Post-formed Gridshell: Digital Form-finding / drawing and building tool. Proceedings of the IASS 2013 Symposium: Beyond the Limits of Man. **Anais...** . p.1–8, 2013.

PONE, S.; COLABELLA, S.; PARENTI, B.; et al. Construction and form-finding of a post-formed timber grid-shell. Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges - Proceedings of the 2nd International Conference on Structures and Architecture, ICSA 2013. **Anais...** . p.245–252, 2013.

- POTTMAN, H. Architectural Geometry as Design Knowledge. **Architectural Design**, v. 80, n. 4, p. 72–77, 2010.
- PUPO, R. T. **Inserção da prototipagem e fabricação digitais no processo de projeto: um novo desafio para o ensino de arquitetura**, 2009. Campinas: Tese (Doutorado em Arquitetura)-Unicamp.
- RESNICK, M. **Lifelong Kindergarten**. Cambridge and London: The MIT Press, 2017.
- ROMCY, N. M. E S. **Abordagem paramétrica e ensino de projeto: proposição de diretrizes metodológicas, considerando estratégias curriculares e o atelier de projeto.**, 2017. Natal, Brasil: Tese (Doutorado em Arquitetura)-, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- SCHEER, D. **The death of drawing: architecture in the age of simulation**. New York: Routledge, 2014.
- SCHEURER, F. Materialising Complexity. **Architectural Design**, v. 80, n. 4, p. 86–93, 2010. London. Disponível em: <www.google.com>. .
- SCHEURER, F. Digital Craftsmanship: from thinking to modeling to building. In: S. Marble (Org.); **Digital Workflows in architecture**. p.110–131, 2012. Basel: Birkhauser.
- SCHEURER, F. Encoding Design. **Inside SmartGeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design**. p.178–194, 2013. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- SCHNABEL, M. A. Architectural Parametric Designing. Proceedings of the 24th eCAADe Conference. **Anais...**, 2004.
- SCHÖN, D. A. **Educando o profissional reflexivo: um novo design para o ensino e a aprendizagem**. Porto Alegre: Artmed, 2000.
- SEDREZ, M.; CELANI, G. A forma não importa. Entrevistado: Arnold Walz. **Portal Vitruvius - Entrevista**, ano 15, jun. 2014. Disponível em: <<https://vitruvius.com.br/index.php/revistas/read/entrevista/15.058/5208>>. Acesso em: 19/4/2021.
- SEDREZ, M.; GAUSS, F. Projetando e fabricando a complexidade. In: G. Celani; M. Sedrez (Orgs.); **Arquitetura Contemporânea e Automação: prática e reflexão**, 2010. São Paulo: ProBooks.
- SG-REPOSITORY. The Sagrada Família, a repository of other Gaudí projects. Disponível em: <<https://blog.sagradafamilia.org/en/divulcation/the-sagrada-familia-repository-of-other-gaudi-projects/>>. Acesso em: 24/6/2021.
- SHEIL, B. Introduction. Protoarchitecture: Analogue and Digital Hybrids. **Architectural Design**, v. 78, n. 4, p. 6–11, 2008. London.

- SHELDEN, D. R. **Digital Surface Representation and the Constructability of Gehry's Architecture**, 2002. Cambridge, Estados Unidos: Massachusetts Institute of Technology.
- SHEPHERD, P.; HUDSON, R.; HINES, D. Aviva Stadium: A parametric success. **International Journal of Architectural Computing**, v. 09, n. 02, p. 167–185, 2011.
- SOBEK, W. Radical Sources of Design Engineering. **Architectural Design**, v. 80, n. 4, p. 24–33, 2010.
- SUTHERLAND, W. J.; BURGMAN, M. Use experts wisely. **Nature**, v. 526, p. 317–318, 2015.
- SYKES, K. Introduction. In: K. Sykes (Org.); **Constructing a New Agenda: architectural theory 1993-2009**, 2010. New York: Princeton Architectural Press.
- TEDESCHI, A. **AAD_Algorithms Aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper**. Brienza Potenza: Le Penseur Publisher, 2014.
- TERZIDIS, K. Algorithmic Form. In: A. Menges; S. Ahlquist (Orgs.); **Computational Design Thinking**. p.94–101, 2011. London: Wiley.
- TOLEDOGRIDSHELL, W. Toledo Gridshell. Disponível em: <<https://www.archilovers.com/projects/87775/toledo-gridshell.html#info>>.
- UNANUE, M. **ENSINANDO FORA DO CENTRO: as referências no ensino de introdução à concepção em arquitetura e suas possibilidades para uma pedagogia do projeto no contexto pericêntrico**, 2016. Rio de Janeiro, Brasil: Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- VIANA, L.; RHEINGANTZ, P. A. Arquitetura contemporânea: abordando coletivamente o lugar, processo de projeto e materialidade. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, v. 7, n. 1, p. 20–37, 2012.
- VROUWE, I.; DISSAUX, T.; JANCART, S.; STALS, A. Concept Learning Through Parametric Design: A learning situation design for parametric design in architectural studio education. In: L. C. Werner; D. Koering (Orgs.); The 38th Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe. **Anais...** p.135–144, 2020. Berlin: eCAADe (Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe).
- WALSH, N. P. 7 Propostas rejeitadas para a Ópera de Sydney. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/911774/7-propostas-rejeitadas-para-a-pera-de-sydney>>. Acesso em: 24/6/2021.
- WHITE, A. **Building Design Team Communication: Practice and Education**, 1996. Aberdeen, Scotland: The Robert Gordon University.
- WONG, F. W. H.; SARAM, D. D. DE; LAM, P. T. I.; CHAN, D. W. M. A Compendium of Buildability Issues from the Viewpoints of Construction Practitioners. **Architectural Science Review**, v. 49, p. 81–90, 2006.

- WOODBURY, R. **Elements of Parametric Design**. New York: Routledge, 2010.
- WORTMANN, T.; TUNÇER, B. Differentiating parametric design: Digital workflows in contemporary architecture and construction. **Design Studies**, v. 52, p. 173–197, 2017.
- WOUDENBERG, F. An Evaluation of Delphi. **Technological Forecasting and Social Change**, n. 40, p. 131–150, 1991.
- YUNIS, N. Pritzker 2015: Frei Otto e a importância da experimentação na arquitetura. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/763770/pritzker-2015-frei-otto-e-a-importancia-da-experimentacao-na-arquitetura>>. Acesso em: 24/6/2021.

APÊNDICES

Apêndice A – Formulário eletrônico aplicado no referencial empírico

Constructibility in collaborative parametric design processes

This is a form that aims to ask architects questions about how constructibility affects their design processes, in collaborative contexts. Your answer will help in one of the stages of a PhD thesis, intituled "Constructibility in collaborative parametric design process", developed by PhD student Verner Moneiro, supervised by Professor Dr. Maisa Veloso (Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brazil) and Professor Dr. Pedro Januário (Universidade de Lisboa, Portugal). The data that you will provide can only be disclose in conferences, scientific journals and the thesis, with your authorization.

The questions will be related to an specific project, indicated by Verner Monteiro when sending this form.

E-mail *

lanc.daniele@gmail.com

1. Design Problem

General questions about the entire design process

Please type the name of the project below

Timber Gridshell Pavillion in the courtyard of Naples Faculty of Architecture

1.1 How much time did you and your team spend to design? *

20 dias

1.2 How much time was necessary to build the project? *

15 dias

1.3 Please describe the role of the design team during the construction phase. *

The design was the builder, the construction was made our self

1.4 What kind of research did the design team do before start designing?

Gridshell structures and computational design

2. Constructibility

Questions about construction aspects during the design process

2.1 Which materials does your design team use more frequently? *

- ☒ Wood
- ☐ Concrete
- ☐ Steel
- ☐ Ceramic
- ☐ Other

2.2 If you could ordinate (mark only one button per row), which of the following design constraints had more impact? *

	Function	Shape (geometry)	Aesthetics (proportion, textures, colours, etc.)	Budget (costs)	Construction	Legislation (codes and laws)	Other
FIRST constraint with more impact	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
SECOND constraint with more impact	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐
THIRD constraint with more impact	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐

2.3 In which design phase was the building material specified? *

- ☒ Beginning of SCHEMATIC DESIGN phase - when the first ideas emerged
- ☐ End of SCHEMATIC DESIGN phase - when represented plans, sections and façades
- ☐ Beginning of DESIGN DEVELOPMENT phase - during the development of technical drawings
- ☐ End of DESIGN DEVELOPMENT phase - when the permits to construction was given
- ☐ CONSTRUCTION DOCUMENTS phase
- ☐ BIDDING phase
- ☐ CONSTRUCTION ADMINISTRATION phase

2.4 Did the design team apply Digital Fabrication during the design and/or construction process? If yes, what type(s)? *

- ☐ Laser cutting
- ☐ Milling (CNC)
- ☐ 3D printing
- ☒ Did not use

2.5 Regarding the use of physical models, what kind of prototypes was used to help with design decisions during the process? *

- ☐ Scaled prototypes
- ☐ 1:1 prototypes (with materials that do not correspond to those used on construction site)
- ☐ 1:1 mock-ups (part of the building, using the same materials used to the future building construction)
- ☒ Did not use
- ☐ Outro:

2.6 If you marked one of the three initial options of the previous question, please explain what kind of influence each physical model had in order to help the design desicions of the team.

.....

3. Collaborative design

Questions about the relationship between the design team

3.1 Please list the professionals, (not necessary names) and their respective roles, during the design process, specially those whose participation was essential to bring constructibility to the building. *

The professor Sergio Pone with his experience on gridshell building and design

3.2 How was the integration of the design team members with the parametric design tools? *

100%

4. Design concept media

Questions about the use of design concept media during the design process

4.1 What types of design tool(s) were used during the design process? (you can mark as much buttons you want) *

	Beginning of Schematic design - when first ideas appears	End of Schematic design - when defined conceptual drawings	Beginning of Design Development - when drawing	End of Design Development - when the permits to construct was given	Construction Documents	Did not use
Hand Sketching	☒	☐	☐	☐	☐	☐
CAD 2D (Technical drawing)	☐	☒	☐	☐	☒	☐
CAD 3D (Geometric modeling)	☐	☐	☐	☐	☐	☒
Parametric Modeling	☐	☒	☒	☐	☐	☐
Building Information Modeling	☐	☐	☐	☐	☐	☒
Structural analysis	☐	☐	☐	☒	☐	☐
Parametric structural analysis	☐	☐	☒	☐	☐	☐

4.2 What was the time of using (in month or years) parametric design tools, before applying it on this project? *

6 months

4.3 What was the main difficulties faced by the design team during the use of parametric modeling for this project? *

bring the real life matter, because the digital design is a simulation of real way of construction

4.4 How did the design team link construction constraints to the parametric model? Did it help to make the construction process easier?

Yes, it simulate the construction process, and give us the way of response of gridshell, so we can modified the shape for better result

Last but not least, the sending phase! Thank you very much for your valuable contribution to my PhD research! If you want (and if it is possible) to help me even more, by sending me images, videos, schemes, drawings, photos or any other media, not protected by confidential agreements, my e-mail address is: vernermonteiro@yahoo.com.br

Click, at the end of the form, in send button, otherwise the answers will not be computed. :(
Kindest regards,
Verner Monteiro.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

Constructibility in collaborative parametric design processes

This is a form that aims to ask architects questions about how constructibility affects their design processes, in collaborative contexts. Your answer will help in one of the stages of a PhD thesis, intituled "Constructibility in collaborative parametric design process", developed by PhD student Verner Moneiro, supervised by Professor Dr. Maísa Veloso (Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brazil) and Professor Dr. Pedro Januário (Universidade de Lisboa, Portugal). The data that you will provide can only be disclose in conferences, scientific journals and the thesis, with your authorization.

The questions will be related to an specific project, indicated by Verner Monteiro when sending this form.

E-mail *

t.dushanov@herzogdemeuron.com

1. Design Problem

General questions about the entire design process

Please type the name of the project below

Arena do Morro, Mae Luiza, Natal RN, Brasil

1.1 How much time did you and your team spend to design? *

Urban Study and Masterplan Vision- 4months, Building design 18months

1.2 How much time was necessary to build the project? *

24 months

1.3 Please describe the role of the design team during the construction phase. *

Review and comment on construction documents and construction for adherence to design intent. Design and review of mock ups, tests, prototypes.

1.4 What kind of research did the design team do before start designing?

In depth study of the city of Natal and the neighbourhood of Mae Luiza in terms of history, demographics, urban development, economy, and the six basic civic activities: living, working, shopping, culture, transport, recreation. The research ended up with an Urban Vision for Mae Luiza. On a building level, research was focused on precedents of sport buildings in Natal and RN, traditional construction techniques and materials, best practices.

2. Constructibility

Questions about construction aspects during the design process

2.1 Which materials does your design team use more frequently? *

- ☐ Wood
- ☒ Concrete
- ☐ Steel
- ☐ Ceramic
- ☐ Other

2.2 If you could ordinate (mark only one button per row), which of the following design constraints had more impact? *

	Function	Shape (geometry)	Aesthetics (proportion, textures, colours, etc.)	Budget (costs)	Construction	Legislation (codes and laws)	Other
FIRST constraint with more impact	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
SECOND constraint with more impact	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐
THIRD constraint with more impact	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐

2.3 In which design phase was the building material specified? *

- ☐ Beginning of SCHEMATIC DESIGN phase - when the first ideas emerged
- ☐ End of SCHEMATIC DESIGN phase - when represented plans, sections and façades
- ☐ Beginning of DESIGN DEVELOPMENT phase - during the development of technical drawings
- ☒ End of DESIGN DEVELOPMENT phase - when the permits to construction was given
- ☐ CONSTRUCTION DOCUMENTS phase
- ☐ BIDDING phase
- ☐ CONSTRUCTION ADMINISTRATION phase

2.4 Did the design team apply Digital Fabrication during the design and/or construction process? If yes, what type(s)? *

- ☒ Laser cutting
- ☒ Milling (CNC)
- ☒ 3D printing
- ☐ Did not use

2.5 Regarding the use of physical models, what kind of prototypes was used to help with design decisions during the process? *

- ☒ Scaled prototypes
- ☒ 1:1 prototypes (with materials that do not correspond to those used on construction site)
- ☒ 1:1 mock-ups (part of the building, using the same materials used to the future building construction)
- ☐ Did not use
- ☐ Outro:

2.6 If you marked one of the three initial options of the previous question, please explain what kind of influence each physical model had in order to help the design decisions of the team.

1:1 mock ups with same materials as in construction: to understand the market and buildability, define details, joints and interfaces, help the construction company to test the assembly and sequencing;

3. Collaborative design

Questions about the relationship between the design team

3.1 Please list the professionals, (not necessary names) and their respective roles, during the design process, specially those whose participation was essential to bring constructibility to the building. *

design architect (international) to define the design and secure quality control , executive architect (Local)- to prepare drawings for approval, tender and construction, adapt project to local regulations, structural engineer, mechanical engineer, landscape designer

3.2 How was the integration of the design team members with the parametric design tools? *

we used parametric design for the layout of the prefabricated concrete blocks; the parametric design tools helped quick redesign of the walls, following the design development. At the end, the project had a precisely drawn each concrete block in the building, which helped the construction company to follow exactly the design.

4. Design concept media

Questions about the use of design concept media during the design process

4.1 What types of design tool(s) were used during the design process? (you can mark as much buttons you want) *

	Beginning of Schematic design - when first ideas appears	End of Schematic design - when defined conceptual drawings	Beginning of Design Development - when drawing	End of Design Development - when the permits to construct was given	Construction Documents	Did not use
Hand Sketching	☒	☒	☒	☒	☒	☐
CAD 2D (Technical drawing)	☒	☒	☒	☒	☒	☐
CAD 3D (Geometric modeling)	☒	☒	☒	☒	☒	☐
Parametric Modeling	☐	☐	☐	☒	☒	☐
Building Information Modeling	☐	☐	☐	☐	☐	☒
Structural analysis	☐	☒	☒	☒	☒	☐
Parametric structural analysis	☐	☐	☐	☐	☐	☒

4.2 What was the time of using (in month or years) parametric design tools, before applying it on this project? *

4 years

4.3 What was the main difficulties faced by the design team during the use of parametric modeling for this project? *

no difficulties. the parametric modeling only helped the process.

4.4 How did the design team link construction constraints to the parametric model? Did it help to make the construction process easier?

before construction there was a detailed plan with all prefabricated block, forming a complex wall geometry, with each separate block drawn and visualized. The construction company had to just follow the drawings and build with high precision.

Last but not least, the sending phase! Thank you very much for your valuable contribution to my PhD research! If you want (and if it is possible) to help me even more, by sending me images, videos, schemes, drawings, photos or any other media, not protected by confidential agreements, my e-mail address is: vernermonteiro@yahoo.com.br

Click, at the end of the form, in send button, otherwise the answers will not be computed. :(
Kindest regards,
Verner Monteiro.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

Apêndice B – Lista de materiais SIPAC-UFRN utilizadas no experimento 01

20/05/2019

SIPAC - Sistema Integrado de Patrimônio, Administração e Contratos

UFRN - SIPAC - Sistema Integrado de Patrimônio, Administração e Contratos

Tempo de Sessão: 01:30

--- MUDAR DE SISTEMA --- ▼

GERVASIO ARAUJO SOUTO NETO

Orçamento: 2019

ASSESSORIA ADMINISTRATIVA (AS/CT) (14.31.11)

PORTAL ADMINISTRATIVO > INCLUSÃO DE MATERIAIS NA REQUISIÇÃO





LISTA DE MATERIAIS ENCONTRADOS (49)

Código	Denominação	Grupo de Material	Unidade de Medida	Valor
302400012722	ALISAR PARA PORTAS E ESQUADRIAS, EM MASSARANDUBA, DE 1A. QUALIDADE	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	METRO	R\$ 3,65
302400000147	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 3" X 4,50M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 23,00
302400000146	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 3" X 5,00M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 30,00
302400024600	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 4" X 4,50M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 91,00
302400029623	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 4" X 5,50M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 91,00
302400024364	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 4" X 6,00M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 91,00
302400002484	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 5" X 4,00M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 80,00
302400000142	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 5" X 4,50M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 79,54
302400023112	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 5" X 5,00M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 85,00
302400029929	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 5" X 6,00M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 100,00
302400023066	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 6" X 4,00M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 76,55
302400029837	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 6" X 4,50M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 112,45
302400000119	BARROTE EM MASSARANDUBA 3" X 6" X 6,00M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 149,95
3024000000480	BARROTE EM MASSARANDUBA - 3" X 8" X 4,00 METROS	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 100,00
302400000118	BARROTE EM MASSARANDUBA - 3" X 8" X 6,00 METROS	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 150,00
3024000000263	CAI BRO DE MASSARANDUBA - 3CM X 4CM X 3,5METROS - EN TREGA A SER REALIZADA NA ESCOLA AGRÍCOLA DE JUNDIAÍ NA CIDADE DE MACAÉ BARN	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 13,65
3024000000264	CAI BRO DE MASSARANDUBA - 3CM X 4CM X 3METROS - EN TREGA A SER REALIZADA NA ESCOLA AGRÍCOLA DE JUNDIAÍ NA CIDADE DE MACAÉ BARN	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 11,70
3024000000262	CAI BRO DE MASSARANDUBA - 3CM X 4CM X 4METROS - EN TREGA A SER REALIZADA NA ESCOLA AGRÍCOLA DE JUNDIAÍ NA CIDADE DE MACAÉ BARN	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 15,60
3024000000261	CAI BRO DE MASSARANDUBA - 3CM X 4CM X 5METROS - EN TREGA A SER REALIZADA NA ESCOLA AGRÍCOLA DE JUNDIAÍ NA CIDADE DE MACAÉ BARN	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 28,62
302400012110	CAI BRO DE MASSARANDUBA - 3CM X 5CM X 2,5METROS	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 16,96
302400023171	CAI BRO DE MASSARANDUBA - 3CM X 5CM X 3,5METROS	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 12,70
302400029767	CAI BRO DE MASSARANDUBA - 3CM X 5CM X 3METROS	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 11,09
302400029788	CAI BRO DE MASSARANDUBA - 3CM X 5CM X 4METROS	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 20,00
302400014580	CAI BRO DE MASSARANDUBA - 3CM X 5CM X 5METROS	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 26,88
302400016957	CAI XA DE PORTA SIMPLES EM MASSARANDUBA, INCLUSIVE ALISARES - MEDIDAS: 0,60 X 2,10M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 96,49
302400000198	CAI XA DE PORTA SIMPLES EM MASSARANDUBA, INCLUSIVE ALISARES - MEDIDAS: 0,70 X 2,10M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 105,00
302400000201	CAI XA DE PORTA SIMPLES EM MASSARANDUBA, INCLUSIVE ALISARES - MEDIDAS: 0,80 X 2,10M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 72,29
302400016949	CAI XA DE PORTA SIMPLES EM MASSARANDUBA, INCLUSIVE ALISARES - MEDIDAS: 0,90 X 2,10M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 110,00
302400029931	FRECHAL DE MASSARANDUBA - 4CM X 6CM X 3METROS	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 19,97
302400021063	LINHA EM MASSARANDUBA 3" X 4" CO M 3,50M DE COMPRIMENTO	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 49,73
302400021071	LINHA EM MASSARANDUBA 3" X 4" CO M 4,50M DE COMPRIMENTO	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 99,65

AJUDA?

https://sipac.ufrn.br/sipac/cadastraMaterialReq.do

20/05/2019

SIPAC - Sistema Integrado de Patrimônio, Administração e Contratos

UFRN - SIPAC - Sistema Integrado de Patrimônio, Administração e Contratos

Tempo de Sessão: 01:30

--- MUDAR DE SISTEMA ---

GERVASIO ARAUJO SOUTO NETO

Orçamento: 2019

ASSESSORIA ADMINISTRATIVA (AS/CT) (14.31.11)

PORTAL ADMINISTRATIVO > I INCLUSÃO DE MATERIAIS NA REQUISIÇÃO

Exibir Detalhes do Material

Ocultar Detalhes do Material

Selecionar Material

LISTA DE MATERIAIS ENCONTRADOS (19)

Código	Denominação	Grupo de Material	Unidade de Medida	Valor
3024000000357	FIXADOR DE ABAS, PARA TELHAS CIMENTÍCIAS, TIPO MAXIPLAC, INCLUIVE ACESÓRIOS DE VEDAÇÃO (AR RUELAS METÁLICAS E BORRACHAS) E PORÇAS	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 1,80
3024000000359	PARAFUSO COM ARUELA E BORRACHA DE VEDAÇÃO P/ FIXAÇÃO DE TELHA MAXIPLAC EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. DIMENSÕES: 8 MM X 180MM	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 2,15
302400012153	PARAFUSO EM AÇO ZINCADO PARA TELHA FIBRO-CIMENTO COM VEDANTE DE BORRACHA E ARUELA	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 0,31
3024000000358	PARAFUSO USADOS NA FIXAÇÃO DE TELHA EM FIBRO-CIMENTO, ESTRUTURAS DE MADEIRA O PARAFUSO EM AÇO GALVANIZADO A FOGO, PARA FIXAÇÃO DE TELHA CIMENTÍCIA, COM NO MÍNIMO 130MM DE COMPRIMENTO E DIÂMETRO 8 MM, COM ROSCA SOBERBA E CABEÇA ESPECIAL. INCLUIVE CONJUNTO DE VEDAÇÃO (AR RUELAS METÁLICAS E BORRACHAS).	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 0,50
3024000000356	PINO RETO EM AÇO GALVANIZADO A FOGO, DIÂMETRO DE 8MM, PARA FIXAÇÃO DE TELHA EM AMIANTO OU SIMILAR, TIPO MAXIPLIC, INCLUIVE ACESÓRIOS DE VEDAÇÃO (AR RUELA METÁLICA E BORRACHA) GRAMPO COM NO MÍNIMO 50CM DE COMPRIMENTO	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 2,20
3024000000077	TELHA COMUM EM CERÂMICA VERMELHA DE 1A	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 0,47
3024000000304	TELHA COMUM EM CERÂMICA VERMELHA DE 1A - ENTREGADA A SER REALIZADA NA ESCOLAGRÁTULA DE JUNDIAÍ NA CIDADE DE MACAIBA RN.	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 0,43
3024000000736	TELHA EM MATERIAL CERÂMICO - TIPO COLONIAL	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	MIL	R\$ 338,70
302400030025	TELHA KALHETÃO	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 575,00
302400020504	TELHA ONDULADA DE FIBRO-CIMENTO (SEM AMIANTO) 1530 X 1100 X 8MM	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 48,85
302400002441	TELHA ONDULADA DE FIBRO-CIMENTO (SEM AMIANTO) 1830 X 1100 X 8MM	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 68,99
302400002450	TELHA ONDULADA DE FIBRO-CIMENTO (SEM AMIANTO) 2130 X 1100 X 8MM	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 81,35
302400019140	TELHA ONDULADA DE FIBRO-CIMENTO (SEM AMIANTO) 2440 X 1100 X 8MM	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 93,14
302400023163	TELHA ONDULADA DE FIBRO-CIMENTO (SEM AMIANTO) 3050 X 1100 X 8MM	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 124,00
302400026200	TELHA ONDULADA DE FIBRO-CIMENTO (SEM AMIANTO) 3200 X 1100 X 8MM	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 130,70
302400011262	TELHA ONDULADA DE FIBRO-CIMENTO (SEM AMIANTO) 3660 X 1100 X 8MM	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 109,90
302400029624	TELHA ONDULADA DE FIBRO-CIMENTO (SEM AMIANTO) 4100 X 1100 X 8MM	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 202,98
302400012099	TELHA ONDULADA DE FIBRO-CIMENTO (SEM AMIANTO) 4600 X 1100 X 8MM	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 249,87
302400029845	TELHA TRANSPARENTE, EM FIBERGLASS, DE 1,83 X 1,10M	MATERIAL PARA MANUTENÇÃO DE BENS IMOVEIS	UNIDADE	R\$ 62,80

- EM ESTOQUE - EM FALTA

<< Voltar Cancelar

AJUDA?

https://sipac.ufrn.br/sipac/cadastraMaterialReq.do



Apêndice C – Roteiro de entrevista aplicada com profissionais do experimento 01

QUESTÕES GERAIS DE PROJETO

- 1) Quais as principais restrições do projeto da equipe?

QUESTÕES RELATIVAS À CONSTRUTIBILIDADE DO OBJETO ARQUITETÔNICO

- 2) Considerando as restrições construtivas do material aplicado no projeto, o que você acha que pode ser mais limitante no processo de projeto que utiliza madeira?

- Como foram capazes de interferir na forma arquitetônica?
- Nos retrabalhos durante o projeto?
- No tempo de execução da obra?
- Na otimização de matéria prima?

QUESTÕES RELATIVAS À EQUIPE COLABORATIVA DE PROJETO

- 3) O processo de projeto contou apenas com arquitetos, ou teve o envolvimento de equipes colaborativas? Se houve colaboração, responda às perguntas 4 a 7.
- 4) Se houve o envolvimento de equipes colaborativas, que outros profissionais, além de arquitetos, colaboraram com o projeto?
- 5) Em qual fase do projeto cada profissional começou a colaborar, e como cada um contribuiu?
- 6) Você acredita que teria feito diferença no desenvolvimento do projeto a fase de inclusão da equipe colaborativa? Por que?
- 7) Como se deu a integração dos profissionais com as ferramentas paramétricas de projeto? Descreva.

QUESTÕES RELATIVAS AOS MEIOS DE CONCEPÇÃO

- 8) Que tipos de ferramentas de representação foram utilizadas no projeto da equipe? Ex.: Croqui, modelos físicos, protótipos rápidos, protótipos de corte, CAD, BIM, Modelagem Paramétrica.
- 9) Quais foram as maiores dificuldades que enfrentou durante a projeção com o uso de modelagem paramétrica? E as vantagens?
- 10) De que modo você, o escritório e/ou a equipe de projeto incorporou as restrições construtivas à modelagem paramétrica?

Apêndice D – Resumo das ações projetuais - experimento 01

G1-P		Ações distribuídas ao longo do tempo no processo de projeto			
Categorias de análise sugeridas		Problema de projeto	Construtibilidade	Projeto Colaborativo	Meios de concepção
Encontros da etapa de concepção e materialização	1ª semana	• Estudos de referência;	• Nenhum aspecto foi discutido;	• Planejamento das atividades;	• Nenhuma ação;
	Intervalo	• Não declararam terem se reunido;	• Não declararam terem se reunido;	• Não declararam terem se reunido;	• Nenhuma ação;
	2ª semana	• Definição do partido;	• Nenhuma ação;	• Aparente formação dos perfis de liderança por G1-ARQ1 e G1-ARQ2;	• Criação de regras para aplicação no algoritmo
	Intervalo	• Não declararam terem se reunido;	• Não declararam terem se reunido;	• Não declararam terem se reunido;	• Nenhuma ação;
	3ª semana	• Pesquisa acerca das consequências do formato pentagonal do pórtico;	• Formato pentagonal do pórtico e suas consequências para custo e execução;	• Discussão entre os profissionais da equipe na busca pela solução mais adequada para resolução dos aspectos construtivos;	• Concentração do uso da ferramenta paramétrica com o profissional G1-ARQ1; • Alteração do pentágono para o triângulo;
	Intervalo	• Aspectos de construtibilidade sendo adotados a partir da consulta às listas de materiais e à avaliação dos resultados da escolha de cada opção;	• Escolha dos perfis estruturais de madeira para os pórticos e para as vigas longitudinais de ligação entre eles;	• Aparente concentração dos trabalhos apenas no profissional G1-ARQ1;	• Detalhamento do código, estabelecendo espessuras das peças e gerenciamento de dados para a eliminação de peças estratégicas nos caminhos;
	4ª semana (apresentação)	• -----	• -----	• -----	• -----
	Intervalo	• Percepção da alteração do sentido de rotação do módulo básico triangular;	• Verificação, em modelo BIM, de aspectos de quantificação e orçamentação;	• Ações individuais do profissional G1-ARQ1 na construção do modelo BIM;	• Extração de modelo paramétrico para plataforma BIM;
	5ª semana (entrega)	• -----	• -----	• -----	• -----
	Intervalo	• Não declararam terem se reunido;	• Não declararam terem se reunido;	• Não declararam terem se reunido;	• Não declararam terem se reunido;
	6ª semana (materialização)	• Não estiveram presentes;	• Não estiveram presentes;	• Não estiveram presentes;	• Não estiveram presentes;

G2-P		Ações distribuídas ao longo do tempo no processo de projeto			
Categorias de análise sugeridas		Problema de projeto	Construtibilidade	Projeto Colaborativo	Meios de concepção
Encontros	1ª semana	• Estudos de referência;	• Nenhum aspecto foi discutido;	• Planejamento das atividades;	• Nenhuma ação;
	Intervalo	• Produziram apresentação das referências projetuais;	• Nenhum aspecto foi discutido;	• Nenhum aspecto foi discutido;	• Nenhuma ação;

	2ª semana	- Definição do partido; - Elaboração dos croquis com as primeiras ideias;	Idealização do contato da estrutura com o solo;	- Interação equilibrada e alternando momentos de liderança entre os profissionais; - Contribuições dos profissionais da equipe em estudos da forma e da relação com o paisagismo existente e proposto;	- Perfil G2-ARQ1 inicia a centralização das ferramentas computacionais; - Perfil G2-ARQ2 produz croquis e o grupo discute as regras a serem utilizadas;
	Intervalo	Não declararam terem se reunido;	Não declararam terem se reunido;	Não declararam terem se reunido;	Não declararam terem se reunido;
	3ª semana	Pesquisa sobre as relações existentes entre os ângulos propostos e encaixes;	Formato pentagonal do pórtico e suas consequências para custo e execução;	Discussão entre os profissionais da equipe na busca pela solução mais adequada para resolução dos aspectos construtivos;	Modelo do Sketchup bem definido;
	Intervalo	Aspectos de construtibilidade sendo adotados a partir da consulta às listas de materiais e à avaliação dos resultados da escolha de cada opção;	- Definição dos perfis de madeira, tanto para o pórtico, quanto para as ripas de ligação; - Definição dos dois módulos estruturais básicos de 1 e 2 metros;	Aparente concentração dos trabalhos apenas no profissional G2-ARQ1, que conduziu a modelagem/modelação paramétrica;	- Tentativa de desenvolver o algoritmo; - Definição parcial do código, para estudo de possibilidades construtivas e geométricas;
	4ª semana (apresentação)	-----	-----	-----	-----
	Intervalo	Desenvolvimento de desenhos técnicos e memorial descritivo para entrega;	-----	-----	Uso de representação CAD 2D e CAD 3D;
	5ª semana (entrega)	-----	-----	-----	-----
	Intervalo	Nenhum aspecto foi discutido;	Nenhum aspecto foi discutido;	Nenhum aspecto foi discutido;	Preparação de modelo para impressão 3D;
	6ª semana (materialização)	Não estiveram presentes;	Não estiveram presentes;	Não estiveram presentes;	Não estiveram presentes;

G3-P		Ações distribuídas ao longo do tempo no processo de projeto			
Categorias de análise sugeridas		Problema de projeto	Construtibilidade	Projeto Colaborativo	Meios de concepção
Encontros da etapa de concepção e	1ª semana	- Estudos de referência; - Planejamento das atividades e discussões;	Nenhum aspecto foi discutido;	Nenhum aspecto foi discutido;	Nenhuma ação;
	Intervalo	- Sistematização dos estudos de referência; - Análise e Síntese do	Nenhum aspecto foi discutido;	Nenhum aspecto foi discutido;	Nenhuma ação;

		problema de projeto;			
	2ª semana	• Definição do partido;	• Nenhum aspecto foi discutido;	• Contribuições diversas em discussão sobre a forma e da construção do código;	• Elaboração dos croquis com as primeiras ideias; • Iniciada a modelagem CAD 3D e a construção do código;
	Intervalo	• Discussões da forma;	• Encaixes da base do pilar;	• Reunião semanal para tratar da discussão da forma e da construção do algoritmo;	• Construção das regras matemáticas da forma então em evolução; • Mudança na forma;
	3ª semana	• Discussões da forma; • Montagem das regras do algoritmo;	• Encaixes da base do pilar;	• Pouca diversidade de informações trocadas; • Discussões centradas majoritariamente na forma;	• Construção do código; • Mudança na forma;
	Intervalo	• -----	• Elaboração de detalhes construtivos;	• Reuniões para tratar da finalização do algoritmo e de construção dos desenhos técnicos;	• Desenvolvimento do algoritmo;
	4ª semana (apresentação)	• -----	• -----	• -----	• -----
	Intervalo	• Desenvolvimento de desenhos técnicos e memorial descritivo para entrega;	• ----	• -----	• Extração de modelo paramétrico para CAD 2D e CAD 3D;
	5ª semana (entrega)	• -----	• -----	• -----	• -----
	Intervalo	• Nenhum aspecto foi discutido;	• Nenhum aspecto foi discutido;	• Nenhum aspecto foi discutido;	• Preparação de modelo para impressão 3D;
	6ª semana (materialização)	• Participação das discussões na etapa de materialização;	• -----	• -----	• -----

G4-P		Ações distribuídas ao longo do tempo no processo de projeto			
Categorias de análise sugeridas		Problema de projeto	Construtibilidade	Projeto Colaborativo	Meios de concepção
Encontros da etapa	1ª semana	• Estudo do conceito e partido do projeto; • Estudos de referência;	• Discussão sobre possível contato de uma estrutura de madeira com os prédios existentes;	• Planejamento das atividades e discussões;	• Croquis conceituais;

	Intervalo	• Sistematização dos estudos de referência; • Análise e Síntese de informações para a elaboração do partido arquitetônico;	• Discussão acerca de como o posicionamento de pilares poderia interferir construtivamente no projeto;	• Alta troca de conhecimentos entre os diversos profissionais;	• Croquis conceituais; • CAD 2D;
	2ª semana	• Definição da primeira ideia; • Elaboração dos croquis com as primeiras ideias em planta;	• Elaboração de desenho de triângulos equiláteros projetados em planta; • Testes em CAD 3D para checar posicionamento dos contraventamentos;	• Alta troca de conhecimentos entre os diversos profissionais em aspectos construtivos;	• Croquis conceituais; • Estudos em CAD 2D e CAD 3D;
	Intervalo	• Pesquisa de como realizar a construção de regras para o Algoritmo;	• Nenhum aspecto foi discutido;	• Reunião semanal para tratar da discussão da forma e da construção do algoritmo;	• Croquis conceituais; • Construção das regras para o código;
	3ª semana	• Pesquisa de possíveis soluções para o algoritmo;	• Estudo de soluções para a ligação estrutural metálica;	• Contribuições diversas para a construção do código;	• Croquis conceituais; • Desenvolvimento do código;
	Intervalo	• -----	• Definição da solução da ligação estrutural metálica;	• Consulta a professor especialista em estruturas de madeira para validação da ligação estrutural metálica;	• Croquis conceituais; • Desenvolvimento do algoritmo com geometria arquitetônica; • Construção do modelo estrutural no Karamba3D;
	4ª semana (apresentação)	• -----	• -----	• -----	• -----
	Intervalo	• Desenvolvimento de desenhos técnicos e memorial descritivo para entrega;	• -----	• -----	• Extração de modelo paramétrico para CAD 3D e BIM;
	5ª semana (entrega)	• -----	• -----	• -----	• -----
	Intervalo	• Pesquisa em projeto para resolução dos problemas que apareceram na ocasião;	• Necessidade de ajuste na ligação estrutural metálica; • Necessidade de afastar posicionamento de pilares devido a acomodação geométrica da ligação estrutural;	• Troca de informações constante entre os profissionais;	• Croquis conceituais; • Preparação de modelo para impressão 3D; • Modelagem em Sketchup da ligação estrutural metálica; • Modelagem BIM do conjunto de vigas e pilares;

	6ª semana (materialização)	• Participação das discussões na etapa de <i>materialização</i>;	• Conclusões acerca dos resultados dos protótipos, e que tipo de novas soluções podem ser adotadas;	• Troca de informações constante entre os profissionais;	• Montagem do modelo em escala 1:50 e do detalhe em escala 1:2;

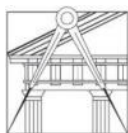
G5-P		Ações distribuídas ao longo do tempo no processo de projeto			
Categorias de análise sugeridas		Problema de projeto	Construtibilidade	Projeto Colaborativo	Meios de concepção
Encontros da etapa de concepção e materialização	1ª semana	• Estudo de referências projetuais; • Definição de conceito;	• Análise da lista de materiais SIPAC;	• Troca de conhecimentos acerca do que está apresentado na lista de materiais;	• Croquis conceituais;
	Intervalo	• Incorporação dos estudos e conceitos em proposta;	• Análise da lista de materiais SIPAC;	• Discussão acerca dos itens da lista SIPAC;	• Croquis conceituais;
	2ª semana	• Ideias embrionárias do projeto ganham forma;	• Análise acerca dos itens da lista SIPAC; • Discussões de construtibilidade de ideias embrionárias;	• Contribuição dos diversos projetistas com suas expertises no estudo da forma e aspectos técnicos construtivos;	• Croquis conceituais;
	Intervalo	• Retorno à análise do conteúdo da lista SIPAC; • Retorno ao enunciado do exercício de concepção;	• Discussão acerca do tensionamento dos pilares para gerar a sua deformação;	• Discussão acerca das consequências dos tipos de solução adotadas no tensionamento dos pilares;	• Croquis conceituais; • Cálculos manuais; • Desenvolvimento do código no Grasshopper;
	3ª semana	• Estudo de maneiras de resolução de problemas de projeto aplicados ao código do algoritmo;	• Discussão acerca do tensionamento dos pilares para gerar a sua deformação; • Discussão acerca do tipo de entrelaçamento da trama de ripas que trava a série de pilares entre si;	• Interação entre os profissionais durante o cálculo manual dos esforços no módulo da estrutura proposta;	• Croquis conceituais; • Análise estrutural no programa SAP 2000; • Desenvolvimento do código no Grasshopper;
	Intervalo	• Estudo de maneiras de resolução de problemas de projeto aplicados ao código do algoritmo;	• Impasse em relação ao tipo de elemento que geraria o tracionamento da estrutura dos pilares;	• Divisão de tarefas na produção de material a ser entregue para a Oficina;	• Croquis conceituais; • Desenvolvimento do código no Grasshopper; • Maquete da interconexão entre módulos da estrutura; • Início do Mock-up
	4ª semana (apresentação)	• ----	• ----	• ----	• ----
	Intervalo	• Estudo de consequências construtivas geradas durante a	• Adoção de solução de torção prévia dos pilares, fora do	• Divisão de tarefas na produção de material a ser	• Croquis conceituais;

		criação da maquete 1:50 e do mock-up;	canteiro/estaleiro de obras, verificado na execução do Mock-up;	entregue para a Oficina;	• Aprimoramento do código no Grasshopper; • CAD 2D e CAD 3D; • Mock-up;
	5ª semana (entrega)	• ----	• ----	• ----	• ----
	Intervalo	• Processo de projeto finalizado;	• Processo de projeto finalizado;	• Processo de projeto finalizado;	• Processo de projeto finalizado;
	6ª semana (materialização)	• Participação nas discussões acerca de materialização;	• Processo de projeto finalizado;	• Processo de projeto finalizado;	• Montagem dos protótipos do grupo 04;

G6-P		Ações distribuídas ao longo do tempo no processo de projeto			
Categorias de análise sugeridas		Problema de projeto	Construtibilidade	Projeto Colaborativo	Meios de concepção
Encontros da etapa de concepção e materialização	1ª semana	• Estudo de referências projetuais; • Definição de conceito; • Consulta à lista SIPAC;	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;
	Intervalo	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;
	2ª semana	• Confluência do grupo no uso de solução formal da referência projetual escolhida, culminando em modelo de co-concepção; • Consulta à lista SIPAC;	• Criação de possível solução com viga-vagão para grandes vãos;	• Discussões sobre o modelo escolhido, de trapézios projetados em planta, e como poderiam ser viabilizados;	• Construção de módulo básico em ambiente CAD 3D com Sketchup; • Início da construção do código no Grasshopper;
	Intervalo	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;
	3ª semana	• Discussão das possibilidades de ligações estruturais a serem utilizadas; • Consulta à lista SIPAC;	• Indicação do uso de chapas metálicas com dentes estampados para encaixes estruturais;	• Contribuição essencialmente dos profissionais G6-ARQ1 e G6-ENG1 em solução de ideias para a viabilização da estrutura;	• Construção do código no Grasshopper;
	Intervalo	• ----	• Análises estruturais pelo profissional G6-ENG1, discutido entre grupos com o profissional G4-ENG1;	• Consulta a profissional externo para validação de modelo estrutural no Karamba3D;	• Finalização do código no Grasshopper; • Simulação no Karamba3D; • Preparação de arquivos para a apresentação;
	4ª semana (apresentação)	• ----	• ----	• ----	• ----
	Intervalo	• ----	• Indicação do uso de parafusos passantes ao invés do uso de chapas	• ----	• Preparação de representações com o uso de

			metálicas com dentes estampados;		programas CAD 2D e 3D;
5ª semana (entrega)	• ----	• ----	• ----	• ----	• ----
Intervalo	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;	• Nenhuma ação;
6ª semana (materialização)	• Não estiveram presentes;	• Não estiveram presentes;	• Não estiveram presentes;	• Não estiveram presentes;	• Não estiveram presentes;

Apêndice E – Enunciado de concepção projetual do experimento 02



FACULDADE DE ARQUITETURA
UNIVERSIDADE DE LISBOA

COURSE: Geometric and Generative Modeling

PROFESSOR: Dr. Pedro Januário

PhD student: Verner Monteiro – PhD Supervisors: Máisa Veloso and Pedro Januário

ARCHITECTURAL DESIGN EXERCISE

The goal of this exercise is to develop a buildable parametric design solution. To reach the objective, the designers will be separated in two groups and must consider real constraints in order to simulate the future construction.

STATEMENT:

Design a complex shaped structure to serve both as a covered path to pedestrians and as a place to stay and contemplate the landscape. The architectural solution must cover part of the internal sidewalks of Jardim do Estoril (Estoril Garden), as highlighted on the map, shown on the .dwg map attached. The design team must consider, during design conception, the following **constraints**:

1) Pre-existences:

- Existing topography;
- Pavement vs permeable areas (grass, sand, etc.);
- Trees;

2) Architectural object to be designed:

- Location of structural foundations;
- Properties of the given material;
- The material to be applied on design must be pallets (entire or decomposed);
- Design or indicate the structural connections between the wood parts, in order to minimize costs and make the fabrication method easier;
- Assembly and time of construction;
- To the construction, all the cuts of the wood parts must be straight, due to the impossibility of using a digital fabrication method;
- It is mandatory to use parametric modeling as one of the conception media (by using Rhinoceros, Grasshopper, and eventually, Karamba3D to structural analysis). The final design must emerge from a range of alternatives. Another design media can be freely used to guide conception (hand sketching, physical models, schemas, scaled prototypes, or others chosen by designers).

Each team must submit:

- A design sheet (PDF file format, size A2);
- A two-page document (PDF file format, size A4), describing the design process. In this document, the group must show the evolution of the design, especially regarding the constructive solutions proposed;
- The parametric design solution in Rhinoceros and Grasshopper (.3dm and .gh file formats).

Apêndice F – Formulário eletrônico - experimento 02

Constructibility in collaborative parametric design processes

This is a form that aims to ask architects questions about how constructibility affects their design processes, in collaborative contexts. Your answer will help in one of the stages of a PhD thesis, intituled "Constructibility in collaborative parametric design process", developed by PhD student Verner Monteiro, supervised by Professor Dr. Maísa Veloso (Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brazil) and Professor Dr. Pedro Januário (Universidade de Lisboa, Portugal). The data that you will provide can only be disclosed in conferences, scientific journals, and the thesis, with your authorization.

It is important to say that the respondents will not be identified, only the researcher and the supervisors will have access to the name of the respondents.

Endereço de e-mail *

benchapman3009@gmail.com

1. Design Problem

General questions about the entire design process

1.1 What were the main constraints of the design process during the exercise?

Material (pallets) and site

1.2 If you could ordinate (mark only one button per row), which of the following design constraints had more impact? *

	Function	Shape (geometry)	Aesthetics (proportion, textres, colours, etc.))	Budget (costs)	Construction	Legislation (codes and laws)	Other
FIRST constraint with more impact	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
SECOND constraint with more impact	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐
THIRD constraint with more impact	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐

2. Constructibility

Questions about construction aspects during the design process

2.1 Regarding the use of physical models, what kind of prototypes was used to help with design decisions during the process? *

- ☐ Scaled prototypes
- ☐ 1:1 prototypes (with materials that do not correspond to those used on construction site)
- ☐ 1:1 mock-ups (part of the building, using the same materials used to the future building construction)
- ☒ Did not use
- ☐ Outro:

2.2 If you marked one of the three initial options of the previous question, please explain what kind of influence each physical model had in order to help the design decisions of the team.

.....

2.3 What is the bigger challenge when designing with wood as constructive material?

inconsistencies in the material

3. Collaborative design

Questions about the relationship between the design team

3.1 Please list the roles of each member of the team, during the design process, especially those whose participation was essential to bring constructibility to the building. *

Person.1. Design and Report Person.2. Design and supervision Person.3. Design and Code Construction Person.4. Primary Code Construction

3.2 How was the integration of the design team members with the parametric design tools? *

Everyone contributed to problem solving within the code with 2 key members focusing on the code and the other 2 assisting when problems were met or designs were changed

3.3 Do you believe that designing as a team makes the difference? If you do believe, please explain how.

It allows for a far more cohesive design with far more factors thought through however it also leads to a lack of direction without a strong leadership. Too many ideas often dilute the pool of ideas and no decisions get made

4. Design concept media

Questions about the use of design concept media during the design process

4.1 What types of design tool(s) were used during the design process? (you can mark as many buttons as you want) *

	Beginning of Schematic design - when first ideas appears	End of Schematic design - when defined conceptual drawings	Beginning of Design Development - when drawing	End of Design Development - when the permits to construct was given	Did not use
Hand Sketching	☒	☒	☐	☐	☐
CAD 2D (Technical drawing)	☒	☒	☐	☐	☐
CAD 3D (Geometric modeling)	☐	☒	☒	☐	☐
Parametric Modeling	☐	☐	☒	☐	☐
Building Information Modeling	☐	☐	☐	☐	☒
Structural analysis	☐	☐	☐	☐	☒
Parametric structural analysis	☐	☐	☐	☐	☒

4.2 What was the time of using (in month or years) parametric design tools, before applying it on this project? *

8 months (4 months using in practice followed by 4 months tuition)

4.3 What was the main difficulties faced by the design team during the use of parametric modeling for this project? *

Computing power. Modelling of simple geometry(it felt much easier to do this without parametric). Understanding of lists

4.4 How did the design team link construction constraints to the parametric model? Did it help to make the construction process easier?

We used parametrics and coding to replace simple geometry with the structural element

Last but not least, the sending phase! Thank you very much for your valuable contribution to my Ph.D. research! If there are any suggestions, please send it to my e-mail address: vernermonteiro@yahoo.com.br

Click, at the end of the form, in send button, otherwise the answers will not be computed. :(

Kindest regards,
Verner Monteiro.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

Constructibility in collaborative parametric design processes

This is a form that aims to ask architects questions about how constructibility affects their design processes, in collaborative contexts. Your answer will help in one of the stages of a PhD thesis, intituled "Constructibility in collaborative parametric design process", developed by PhD student Verner Monteiro, supervised by Professor Dr. Maísa Veloso (Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brazil) and Professor Dr. Pedro Januário (Universidade de Lisboa, Portugal). The data that you will provide can only be disclosed in conferences, scientific journals, and the thesis, with your authorization. It is important to say that the respondents will not be identified, only the researcher and the supervisors will have access to the name of the respondents.

Endereço de e-mail *

arturmincberger@gmail.com

1. Design Problem

General questions about the entire design process

1.1 What were the main constraints of the design process during the exercise?

If some ideas were doable or not. For example intersecting two parts, made it impossible to work.

1.2 If you could ordinate (mark only one button per row), which of the following design constraints had more impact? *

	Function	Shape (geometry)	Aesthetics (proportion, textres, colours, etc.))	Budget (costs)	Construction	Legislation (codes and laws)	Other
FIRST constraint with more impact	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐
SECOND constraint with more impact	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
THIRD constraint with more impact	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐

2. Constructibility

Questions about construction aspects during the design process

2.1 Regarding the use of physical models, what kind of prototypes was used to help with design decisions during the process? *

- ☒ Scaled prototypes
- ☐ 1:1 prototypes (with materials that do not correspond to those used on construction site)
- ☐ 1:1 mock-ups (part of the building, using the same materials used to the future building construction)
- ☐ Did not use
- ☐ Outro:

2.2 If you marked one of the three initial options of the previous question, please explain what kind of influence each physical model had in order to help the design decisions of the team.

They made problems more apparent right away. Also helped to understand what could have been designed and what have not.

2.3 What is the bigger challenge when designing with wood as constructive material?

Wood being sometimes not strong enough for some approaches.

3. Collaborative design

Questions about the relationship between the design team

3.1 Please list the roles of each member of the team, during the design process, especially those whose participation was essential to bring constructibility to the building. *

Ayaka- co-creating the core idea for the whole project and co-creating the grasshopper code.

Yuka- co-creating the fore idea of the shape of the pavilion. creating plans and sections. Making the InDesign presentation boards.

Artur- co-creating the code, making renderings, co-creating the idea for the whole project

Virgine- preparing weekly reports

3.2 How was the integration of the design team members with the parametric design tools? *

Very smooth and fast in a good way.

3.3 Do you believe that designing as a team makes the difference? If you do believe, please explain how.

Yes, because of having more than one point of view.

4. Design concept media

Questions about the use of design concept media during the design process

4.1 What types of design tool(s) were used during the design process? (you can mark as many buttons as you want) *

	Beginning of Schematic design - when first ideas appears	End of Schematic design - when defined conceptual drawings	Beginning of Design Development - when drawing	End of Design Development - when the permits to construct was given	Did not use
Hand Sketching	☒	☐	☒	☐	☐
CAD 2D (Technical drawing)	☐	☐	☒	☐	☐
CAD 3D (Geometric modeling)	☐	☒	☒	☐	☐
Parametric Modeling	☐	☐	☒	☒	☐
Building Information Modeling	☐	☐	☐	☒	☐
Structural analysis	☐	☐	☐	☐	☒
Parametric structural analysis	☐	☐	☐	☐	☒

4.2 What was the time of using (in month or years) parametric design tools, before applying it on this project? *

Less than a month.

4.3 What was the main difficulties faced by the design team during the use of parametric modeling for this project? *

Not being able to create the most optimal code.

4.4 How did the design team link construction constraints to the parametric model? Did it help to make the construction process easier?

The wooden modules had specific dimensions what made it harder to construct wide enough pavilion.

But then it helped to create the idea of making expandable pavilion.

Last but not least, the sending phase! Thank you very much for your valuable contribution to my Ph.D. research! If there are any suggestions, please send it to my e-mail address: vernermonteiro@yahoo.com.br

Click, at the end of the form, in send button, otherwise the answers will not be computed. :(

Kindest regards,
Verner Monteiro.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

Apêndice G – Formulário eletrônico I – Validação

Método Delphi: avaliação de doutorado/doutoramento na área de projeto paramétrico colaborativo.

*Obrigatório

1. E-mail *

Parte I - Perfil de especialistas em projeto paramétrico

Tempo estimado de resposta das partes I e II: 10 a 15 minutos

Esta parte do formulário busca sondar o perfil de especialistas atuantes na área de projeto paramétrico, seja no ensino, pesquisa e/ou prática profissional. O objetivo é formar um grupo desses especialistas que possam contribuir, na parte II, com a validação de um modelo de diretrizes metodológicas aplicável a projetos paramétricos colaborativos.

O modelo foi inicialmente concebido em uma das etapas da tese de doutorado em desenvolvimento intitulada "a construtibilidade no processo de projeto paramétrico colaborativo". A tese é orientada em regime de cotutela pela Professora Doutora Maísa Veloso (Departamento de Arquitetura da UFRN/Brasil) e pelo Doutor Pedro Gomes Januário (Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa/Portugal).

2. 1. Graduação: *

Marque todas que se aplicam.

- ☐ Arquitetura
☐ Engenharia Civil

3. 2. Campo(s) de atuação profissional: *

Marque todas que se aplicam.

- ☐ Professor
☐ Pesquisador/Investigador
☐ Projetista

4. 3. Qual o seu tempo de experiência, em anos, com projetos paramétricos no âmbito do ensino, pesquisa ou prática profissional? *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Menor que 1 ano
☐ Entre 1 e 5 anos
☐ Entre 5 e 10 anos
☐ Maior que 10 anos

5. 4. As suas experiências com estes projetos envolvem contextos colaborativos? *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Sempre
☐ Frequentemente
☐ Esporadicamente
☐ Nunca

6. 5. Como se dá a sua atuação no âmbito da aplicação de tecnologias construtivas? *

Marque todas que se aplicam.

- ☐ Pesquisa em tecnologias construtivas digitais (mediadas pelo uso de aplicações computacionais e máquinas CNC, corte a plasma, manufatura aditiva, corte a laser, ou similares)
☐ Pesquisa em tecnologias construtivas analógicas (envolvendo métodos tradicionalmente utilizados na construção civil, sem a mediação de computadores)
☐ Atuo como projetista na prática profissional em canteiro de obras
☐ Utilizo-as indiretamente na minha prática profissional e institucional
☐ Não se aplica

Outro: ☐ _____

7. 6. Que meios de concepção e desenvolvimento de projeto são aplicados na sua atuação como PROFESSOR? *

Marque todas que se aplicam.

- ☐ Croquis - Desenhos manuais
☐ Modelos físicos - Maquetes
☐ Modelagem/Modelação Geométrica
☐ Modelagem/Modelação Paramétrica
☐ Análise estrutural
☐ Análise estrutural paramétrica
☐ Prototipagem rápida
☐ Fabricação Digital
☐ Protótipo construtivo (Mock-up)
☐ Não se aplica

Outro: ☐ _____

8. 7. Que meios de concepção e desenvolvimento de projeto são aplicados na sua atuação como PESQUISADOR/INVESTIGADOR? *

Marque todas que se aplicam.

- ☐ Croquis - Desenhos manuais
- ☐ Modelos físicos - Maquetes
- ☐ Modelagem/Modelação Geométrica
- ☐ Modelagem/Modelação Paramétrica
- ☐ Análise estrutural
- ☐ Análise estrutural paramétrica
- ☐ Prototipagem rápida
- ☐ Fabricação Digital
- ☐ Protótipo construtivo (Mock-up)
- ☐ Não se aplica

Outro: ☐ _____

9. 8. Que meios de concepção e desenvolvimento de projeto são aplicados na sua atuação como PROJETISTA? *

Marque todas que se aplicam.

- ☐ Croquis - Desenhos manuais
- ☐ Modelos físicos - Maquetes
- ☐ Modelagem/Modelação Geométrica
- ☐ Modelagem/Modelação Paramétrica
- ☐ Análise estrutural
- ☐ Análise estrutural paramétrica
- ☐ Prototipagem rápida
- ☐ Fabricação Digital
- ☐ Protótipo construtivo (Mock-up)
- ☐ Não se aplica

Outro: ☐ _____

Parte II: opinião de especialistas acerca de modelo de diretrizes metodológicas para projetos paramétricos colaborativos

A tese de doutorado em desenvolvimento, mencionada no formulário anteriormente aplicado, investiga o impacto da construtibilidade no processo de projeto paramétrico colaborativo. A abordagem metodológica da tese é baseada principalmente em estudos empíricos e experimentos de projeto, que subsidiaram a proposição de um modelo inicial de diretrizes metodológicas.

A observação direta dos experimentos de projeto realizados possibilitou o mapeamento de ações projetuais, tomadas ao longo do tempo, por equipes colaborativas. O resultado foi publicado no periódico on-line Vitruvius, com o link: <https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/21.248/8004>. Essas ações projetuais serviram de base para a criação do modelo a ser validado pelos especialistas participantes desta etapa da pesquisa.

A partir da análise do modelo preliminar, por favor opine acerca da estrutura geral proposta e atribua pesos específicos para as ações projetuais que devem estar presentes no processo de projeto paramétrico (PPP) colaborativo.

Em caso de dúvida, não hesite em entrar em contacto pelo e-mail: monteigoverner@gmail.com

I – Estrutura do Modelo preliminar de diretrizes metodológicas

O modelo preliminarmente proposto está centrado na colaboração multidisciplinar entre profissionais de especialidades diversas. As interações entre os membros da equipe de projeto devem, segundo Chiu (2002, pp.205-206) < <http://bit.ly/208JcA27> >, ser baseadas em negociação, consultoria, reflexões e tomada de decisões. Propomos que essa colaboração seja permeada por ações projetuais diversificadas, promovendo a sinergia entre a implementação do recurso computacional e os aspectos da construtibilidade do edifício que está sendo projetado.

Os resultados dos experimentos de projeto mostraram que, de um total de 16 ações projetuais observadas, algumas foram RECORRENTES, e a maioria delas TRANSITÓRIAS. Essa classificação será devidamente detalhada nas seções II e III deste formulário.

A estrutura do modelo sugere que a equipe de projetistas adote o que chamamos de ações projetuais recorrentes (em tons de laranja) e transitórias (em tons de azul). Ressaltamos que a grande maioria das ações apresentadas, apesar de estarem dispostas graficamente em ordem, podem ser adotadas de maneira cíclica e em sequência distinta, devido às incertezas inerentes ao ato de projetar.

Aprecie, a seguir, o modelo preliminar de diretrizes metodológicas para projetos paramétricos com ênfase na construtibilidade.

Modelo preliminar de diretrizes metodológicas para projetos paramétricos colaborativos



10. 1. Acrescente, neste espaço, a sua opinião acerca da estrutura proposta. Caso seja necessário, sugira acréscimos, decréscimos ou reestruturação. *

II – Ações projetuais TRANSITÓRIAS

Classificamos como ações projetuais transitórias as que os projetistas transitam por elas, mas que são revisitadas com baixa frequência. Muitas delas podem ter duração amplamente superior às ações projetuais recorrentes, indicando que os projetistas podem investir períodos contínuos e longos nelas.

A partir dessa classificação utilizada, pressupomos que, das 16 ações projetuais encontradas nos experimentos, 14 delas foram transitórias e duas recorrentes.

A palavra restrição, aplicada em muitas das ações projetuais TRANSITÓRIAS, está relacionada ao termo restrições de projeto, utilizado por Lawson (2011, pp.100-109) < <http://bit.ly/3f7gKZr> >, e refere-se a mecanismos para assegurar que o objeto projetado cumpra as funções dele exigidas (Op Cit, p.100) < <http://bit.ly/3d0HPpg> >.

Agora, estabeleça um peso para cada uma das ações listadas a seguir, considerando a escala numérica quali-quantitativa de 1 a 4, em que o 1 indica um peso baixo, e o 4 um peso elevado:

11. 2. ANÁLISE DE RESTRIÇÕES FORMAIS E SIMBÓLICAS [sendo a restrição formal “relativa à organização visual do objeto” (LAWSON, 2011, p.103) < <http://bit.ly/3cXIZDj> >, e a simbólica, quando há a “utilização de algum significado simbólico como parte central do processo” (LAWSON, 2011, p.105) < <http://bit.ly/3fl6R5F> >]. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

12. 3. ANÁLISE DE RESTRIÇÕES DE PRÉ-EXISTÊNCIAS (que são o conjunto de elementos relacionados ao contexto construído e natural já existente, como terreno, entorno edificado, paisagismo, condições de infraestruturas, etc). *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

13. 4. ANÁLISE DE RESTRIÇÕES FUNCIONAIS (que são provenientes do programa arquitetônico, assim como de todas as suas relações). *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

14. 5. ANÁLISE DE RESTRIÇÕES AMBIENTAIS (advindas, quer dos aspectos do edifício na sua globalidade, quer dos aspectos exteriores a ele). *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

15. 6. ANÁLISE DE RESTRIÇÕES CONSTRUTIVAS (provenientes das: propriedades físicas dos materiais aplicados; suas dimensões; características estruturais; as técnicas construtivas disponíveis; a capacidade da mão-de-obra; a logística; a durabilidade; orçamentação; quantificação; entre outros). *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

16. 7. ESTUDOS DE REFERÊNCIAS PROJETUAIS [que podem auxiliar os projetistas a se situarem “em relação à produção arquitetônica presente e anterior, além de permitir a compreensão de diferentes situações de projeto” ‘[(UNANUE, 2016, p.156) < <https://bit.ly/2NJs03> >]. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

17. 8. DEFINIÇÃO DO PARTIDO ARQUITETÔNICO (que inclui as primeiras ideias sintetizadas a partir do contato com as restrições projetuais e do estudo de referências. O partido arquitetônico será o embrião do que virá a ser o produto projetual desenvolvido durante o processo de projeto). *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

18. 9. ESTUDO VOLUMÉTRICO (de volumetrias feitas por ferramentas não paramétricas). *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

19. 10. CRIAÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL (a partir de esquemas em que são definidas as relações entre os principais elementos estruturais do projeto). *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

20. 11. PLANEJAMENTO E CRIAÇÃO DAS REGRAS DA MODELAGEM PARAMÉTRICA (regras consideradas importantes para a futura estruturação do código). *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

21. 12. ESTRUTURAÇÃO DO CÓDIGO NA MODELAGEM PARAMÉTRICA (que concerne o uso racional de parâmetros e componentes, possibilitando a otimização de processos). *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

22. 13. ANÁLISE ESTRUTURAL DO MODELO PARAMÉTRICO. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

23. 14. AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES ALTERNATIVAS, A PARTIR DO MODELO PARAMÉTRICO. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

24. 15. DOCUMENTAÇÃO DO PROJETO (de âmbito gráfico ou escrito) *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

II – Ações projetuais RECORRENTES

Propomos que as primeiras devem ser adotadas com alta frequência, e sua recorrência não indica que são constantes nem têm grande duração. Sinaliza que podem ser revisitadas, frequentemente, em todo o ciclo de análise, síntese e avaliação (LAWSON, 2011, p.55) < <http://bit.ly/3vRk8sn> >. Elas podem ser alternadas com outras ações, sobretudo com aquelas que subsidiam a modelagem paramétrica e a construtibilidade do objeto arquitetônico. Estabeleça um peso para cada uma das ações listadas a seguir:

25. 16. ESTUDOS DE MATERIALIDADE (para toda e qualquer iniciativa de converter soluções projetuais em matéria; seja ela com o uso de protótipos analógicos ou digitais, que sirva como meio para troca de ideias coletivas ou reflexões individuais. Por exemplo: origamis; modelos físicos de estudo; protótipos rápidos; mock-ups; etc.). *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

26. 17. ANÁLISES DE VIABILIDADE CONSTRUTIVA (com recurso à sintetização de soluções construtivas potenciais, que consideram as restrições construtivas inicialmente lançadas. Essa ação pode envolver a racionalização geométrica; a análise de propriedades físicas dos materiais; os métodos construtivos; a criação de detalhes construtivos de encaixes estruturais, entre outros)* *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 4 (Elevado)
☐ 3
☐ 2
☐ 1 (Baixo)

Visualize novamente o modelo para responder à questão 18:



27. 18. Concorda com o posicionamento proposto para cada uma das 16 ações projetuais recorrentes e transitórias? Alguma das ações transitórias deveria ser recorrente, ou vice versa? Relacione, a seguir, a que categoria acha que cada ação deve estar enquadrada. *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Transitória	Recorrente
Análise de restrições formais e simbólicas	☐	☐
Análise de restrições de pré-existências	☐	☐
Análise de restrições funcionais	☐	☐
Análise de restrições ambientais	☐	☐
Análise de restrições construtivas	☐	☐
Estudos de referências projetuais	☐	☐
Definição do partido arquitetônico	☐	☐
Estudo volumétrico	☐	☐
Criação do modelo estrutural	☐	☐
Planejamento e criação das regras da modelagem/modelação paramétrica	☐	☐
Estruturação do código na modelagem/modelação paramétrica	☐	☐
Análise estrutural do modelo paramétrico	☐	☐
Avaliação de soluções alternativas, a partir do modelo paramétrico.	☐	☐
Documentação do projeto	☐	☐
Estudos de materialidade	☐	☐
Análises de viabilidade construtiva	☐	☐

Fim!

Muito obrigado pela sua contribuição! Por fim, não esqueça de clicar em enviar. Em breve, enviaremos o segundo e último formulário.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

Apêndice H – Formulário eletrônico II – Validação

Formulário 2: consolidação do método Delphi

Tempo estimado de resposta: 5 minutos

A partir da compilação das respostas fornecidas pelos demais especialistas participantes dessa pesquisa/investigação, responda às 3 perguntas deste formulário final.

Em caso de dúvida, não hesite em entrar em contacto pelo e-mail: monteiroverner@gmail.com

*Obrigatório

1. E-mail *

2. 1. Assinale os TIPOS de projeto para os quais é mais solicitado(a) profissionalmente. *

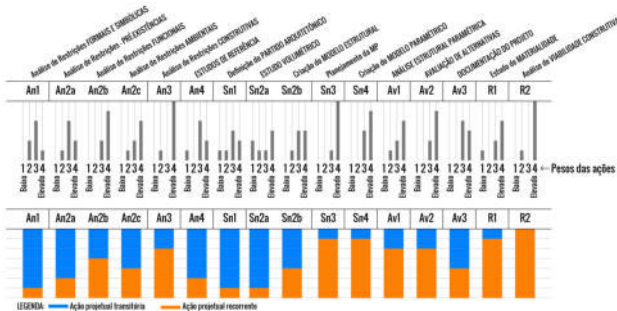
Marcar apenas uma oval por linha.

	Pequeno (até 500,00 m²)	Médio (entre 500 e 2.500 m²)	Grande (entre 2.500 e 10.000 m²)	Muito grande (superior a 10.000 m²)	Não se responde/Não se aplica
Stands efêmeros para feiras e eventos/Pavilhões experimentais	☐	☐	☐	☐	☐
Habitação unifamiliar	☐	☐	☐	☐	☐
Habitação coletiva	☐	☐	☐	☐	☐
Edifícios de Comércio a retalho ou grandes superfícies	☐	☐	☐	☐	☐
Edifícios de Escritórios e Serviços	☐	☐	☐	☐	☐
Reabilitação/Retrofit/Reuso/Requalificação de edifícios	☐	☐	☐	☐	☐
Projetos de equipamentos complexos (aeroportos, hospitais, museus, etc.)	☐	☐	☐	☐	☐

I – Resultados do formulário anterior

Desde já agradecemos o seu anterior contributo para esta pesquisa. Na imagem abaixo apresentamos uma síntese dos resultados obtidos através dos inquéritos realizados. É chegado o momento de procedermos à validação destes resultados, pelo que solicitamos que respondam as perguntas número 2 e 3.

Gráfico com os resultados dos pesos (de 1 a 4) e categorias (transitórias e recorrentes) atribuídos a cada ação projetual. Ver maior (<https://bit.ly/33i6e5t>)



3. 2. Matriz 1: estabeleça o peso de 1 a 4 para cada ação projetual, em que o 1 indica um peso baixo, e o 4 um peso elevado. *

Marcar apenas uma oval por linha.

	4 (Elevado)	3	2	1 (Baixo)
An1: Análise de restrições FORMAIS E SIMBÓLICAS	☐	☐	☐	☐
An2a: Análise de restrições de PRÉ-EXISTÊNCIAS	☐	☐	☐	☐
An2b: Análise de restrições FUNCIONAIS	☐	☐	☐	☐
An2c: Análise de restrições AMBIENTAIS	☐	☐	☐	☐
An3: Análise de restrições CONSTRUTIVAS	☐	☐	☐	☐
An4: ESTUDOS DE REFERÊNCIA (PRECEDENTES)	☐	☐	☐	☐
Sn1: Definição do PARTIDO ARQUITETÔNICO	☐	☐	☐	☐
Sn2a: ESTUDO VOLUMÉTRICO	☐	☐	☐	☐
Sn2b: Criação do MODELO ESTRUTURAL	☐	☐	☐	☐
Sn3: Planejamento da MODELAGEM PARAMÉTRICA	☐	☐	☐	☐
Sn4: Criação do MODELO PARAMÉTRICO	☐	☐	☐	☐
Av1: Análise estrutural Paramétrica	☐	☐	☐	☐
Av2: Avaliação de Alternativas	☐	☐	☐	☐
Av3: Documentação do projeto	☐	☐	☐	☐
R1: Estudo de materialidade	☐	☐	☐	☐
R2: Análise de viabilidade construtiva	☐	☐	☐	☐

4. 3. Matriz 1: estabeleça o peso de 1 a 4 para cada ação projetual, em que o 1 indica um peso baixo, e o 4 um peso elevado. *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Transitória	Recorrente
An1: Análise de restrições FORMAIS E SIMBÓLICAS	☐	☐
An2a: Análise de restrições de PRÉ-EXISTÊNCIAS	☐	☐
An2b: Análise de restrições FUNCIONAIS	☐	☐
An2c: Análise de restrições AMBIENTAIS	☐	☐
An3: Análise de restrições CONSTRUTIVAS	☐	☐
An4: ESTUDOS DE REFERÊNCIA (PRECEDENTES)	☐	☐
Sn1: Definição do PARTIDO ARQUITETÔNICO	☐	☐
Sn2a: ESTUDO VOLUMÉTRICO	☐	☐
Sn2b: Criação do MODELO ESTRUTURAL	☐	☐
Sn3: Planejamento da MODELAGEM PARAMÉTRICA	☐	☐
Sn4: Criação do MODELO PARAMÉTRICO	☐	☐
Av1: Análise estrutural Paramétrica	☐	☐
Av2: Avaliação de Alternativas	☐	☐
Av3: Documentação do projeto	☐	☐
R1: Estudo de materialidade	☐	☐
R2: Análise de viabilidade construtiva	☐	☐

Muito obrigado pela sua participação! Por fim, não esqueça de clicar em enviar.

Experimento de projeto 01

Grupo G1-P

Link de acesso: <https://bit.ly/3c1yKNy>

Grupo G2-P:

Link de acesso: <https://bit.ly/3fugH4t>

Grupo G3-P:

Link de acesso: <https://bit.ly/3vAUk2Y>

Grupo G4-P:

Link de acesso: <https://bit.ly/3fvNmqm>

Grupo G5-P:

Link de acesso: <https://bit.ly/3i1QYCc>

Grupo G6-P:

Link de acesso: <https://bit.ly/3uw31KE>

Experimento de projeto 02

Grupo G1-E:

Link de acesso: <https://bit.ly/34qaYGT>

Grupo G2-E:

Link de acesso: <https://bit.ly/34qb6Gn>

Anexo I – Parecer Consubstanciado do CEP

PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: A Construtibilidade no Processo de Projeto Paramétrico

Pesquisador: Verner Max Liger de Mello Monteiro

Área Temática:

Versão: 1

CAAE: 08216919.6.0000.5292

Instituição Proponente: Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 3.232.672

Apresentação do Projeto:

A integração de ferramentas computacionais ao processo de projeto em Arquitetura tem trazido consigo mudanças significativas que interferem no modo de projetar e construir o edifício. A incorporação recente da modelagem paramétrica proporciona a arquitetos a possibilidade de experimentar formas geométricas sem precedentes, mas traz consigo a dificuldade de materialização do edifício projetado, que comumente não é considerada nas fases iniciais da concepção. Essa dificuldade pode provocar a descaracterização do projeto ou incorrer em inviabilidade construtiva. Projetar com o auxílio de modelagem paramétrica visando a construtibilidade do edifício traz ao processo uma alta necessidade de integração entre estrutura, materiais, fabricação e construção. Essa complexidade de tarefas requer, segundo a literatura, a atuação de uma equipe de projeto trabalhando colaborativamente. Esta pesquisa pretende analisar como as questões relativas à construtibilidade, consideradas por uma equipe colaborativa, interferem no processo de projeto paramétrico. O método utilizado será o da pesquisa construtiva, dividida em compreensão (revisão de literatura), proposição de diretrizes metodológicas (amparadas por análise de discursos de arquitetos e realização de experimentos de projeto) e validação (teste das diretrizes metodológicas propostas da fase anterior em um experimento de projeto). Espera-se que a pesquisa contribua para a área de CAAD (Computer Aided Architectural Design) com um estudo sobre o impacto da construtibilidade no processo de projeto de Arquitetura e com a indicação de diretrizes metodológicas para um projeto paramétrico focado na

Endereço: Avenida Nilo Peçanha, 620 - Prédio Administrativo - 1º Andar - Espaço João Machado

Bairro: Petrópolis

CEP: 59.012-300

UF: RN

Município: NATAL

Telefone: (84)3342-5003

Fax: (84)3202-3941

E-mail: cep_huol@yahoo.com.br

Continuação do Parecer: 3.232.672

construtibilidade.

Objetivo da Pesquisa:

Geral:

Analisar como as questões relativas à construtibilidade, consideradas por uma equipe colaborativa, interferem no processo de projeto paramétrico.

Específicos:

- Avaliar a contribuição de equipes colaborativas de arquitetos, engenheiros calculistas e construtores para uma melhor inserção da construtibilidade no processo de projeto paramétrico;
- Analisar o impacto da adoção das restrições construtivas de cada material e sistema durante o processo de projeto paramétrico;
- Avaliar como as restrições construtivas se integram à modelagem paramétrica durante a projeção;
- Indicar diretrizes metodológicas para projetos paramétricos em madeira focados na construtibilidade.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

O TCLE, assim como as informações básicas do projeto, apontam a possibilidade de riscos mínimos de desconforto durante a realização da entrevista, uma vez que o participante pode não entender alguma pergunta ou não se sentir à vontade em respondê-la; no entanto isso será minimizado, pois o pesquisador se dispõe a tirar todas as possíveis dúvidas. Os benefícios desta pesquisa são coletivos, com rebatimentos na formação profissional em nível de pós-graduação, pois se espera-se contribuir com a discussão acerca do impacto da construtibilidade no processo de projeto e com a indicação de diretrizes metodológicas para um projeto paramétrico focado na construtibilidade.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Trata-se de um projeto de pesquisa de doutoramento da área de Arquitetura da UFRN, com o objetivo de analisar como as questões relativas à construtibilidade, consideradas por uma equipe colaborativa, interferem no processo de projeto paramétrico. O estudo proposto insere-se numa nova vertente de pesquisa e prática profissional, que considera novas tecnologias e processos projetuais/construtivos na área de arquitetura e engenharia. Portanto, sua discussão faz-se relevante para o cenário acadêmico e do mercado profissional da área na contemporaneidade.

Endereço: Avenida Nilo Peçanha, 620 - Prédio Administrativo - 1º Andar - Espaço João Machado

Bairro: Petrópolis

CEP: 59.012-300

UF: RN

Município: NATAL

Telefone: (84)3342-5003

Fax: (84)3202-3941

E-mail: cep_huol@yahoo.com.br

Continuação do Parecer: 3.232.672

Em se tratando da redação do projeto e das informações básicas inseridas na Plataforma, o trabalho apresenta todos os aspectos necessários à sua compreensão e execução, incluindo detalhamento dos procedimentos metodológicos com critérios de inclusão e exclusão dos participantes da pesquisa, riscos, benefícios e cronograma. O TCLE expõe todos os aspectos considerados essenciais ao seu entendimento, incluindo considerações sobre riscos e benefícios da pesquisa.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

O protocolo de pesquisa apresenta como itens obrigatórios: informações básicas do projeto, projeto detalhado (com cronograma), TCLE; carta de anuência; folha de rosto; folha de identificação do pesquisador; projeto resumido.

Recomendações:

Não se aplica

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Não há pendências

Considerações Finais a critério do CEP:

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_1295900.pdf	19/02/2019 23:12:22		Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	06_Termo_de_Concessao_coordenacao_carimbado.pdf	19/02/2019 23:10:13	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito
Declaração de Instituição e Infraestrutura	02_anuencia_ppapma_carimbado.pdf	19/02/2019 23:09:49	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	06_Termo_de_Concessao_discente.pdf	11/02/2019 11:44:14	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	05_Termo_de_autorizacao_para_uso_de_imagens_VERNER_MONTEIRO.pdf	11/02/2019 11:38:02	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito

Endereço: Avenida Nilo Peçanha, 620 - Prédio Administrativo - 1º Andar - Espaço João Machado

Bairro: Petrópolis

CEP: 59.012-300

UF: RN

Município: NATAL

Telefone: (84)3342-5003

Fax: (84)3202-3941

E-mail: cep_huol@yahoo.com.br

**UFRN - HOSPITAL
UNIVERSITÁRIO ONOFRE
LOPES DA UNIVERSIDADE**



Continuação do Parecer: 3.232.672

TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	04_Termo_de_autorizacao_para_gravacao_de_voz_VERNER_MONTEIRO.pdf	11/02/2019 11:37:48	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito
Declaração de Pesquisadores	02_Declaracao_de_nao_inicio_VERNER_MONTEIRO.pdf	11/02/2019 11:36:43	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	01_TCLE_VERNER_MONTEIRO_Participante_Experimentos.pdf	11/02/2019 11:35:46	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	01_TCLE_VERNER_MONTEIRO_Arquiteto_discurso.pdf	11/02/2019 11:35:32	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Projeto_de_Pesquisa_Verner_Monteiro.pdf	11/02/2019 11:35:01	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito
Declaração de Pesquisadores	08_Identificacao_do_pesquisador_VERNER_MONTEIRO.pdf	11/02/2019 11:34:41	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito
Declaração de Pesquisadores	07_Termo_de_Confidencialidade_VERNER e MAISA.pdf	11/02/2019 11:33:49	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito
Brochura Pesquisa	01_Brochura.pdf	11/02/2019 11:32:50	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito
Folha de Rosto	folhaDeRosto_Assinada.pdf	11/02/2019 11:23:50	Verner Max Liger de Mello Monteiro	Aceito

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

NATAL, 29 de Março de 2019

Assinado por:
jose diniz junior
(Coordenador(a))

Endereço: Avenida Nilo Peçanha, 620 - Prédio Administrativo - 1º Andar - Espaço João Machado
Bairro: Petrópolis **CEP:** 59.012-300
UF: RN **Município:** NATAL
Telefone: (84)3342-5003 **Fax:** (84)3202-3941 **E-mail:** cep_huol@yahoo.com.br

Anexo II – Ficha de unidade curricular da disciplina MGG



FICHA DE UNIDADE CURRICULAR

Unidade Curricular

201324013 - MODELAÇÃO GEOMÉTRICA E GENERATIVA

Tipo

Obrigatória

Ano lectivo

2019/20

Curso

MI Arquitetura - Esp.Arq

Ciclo de estudos

2º

Créditos

3.50 ECTS

Idiomas

Português ,Inglês

Periodicidade

semestral

Pré requisitos

Ano Curricular / Semestre

4º / 1º

Área Disciplinar

Desenho, Geometria e Computação

Horas de contacto (semanais)

Teóricas	Práticas	Teórico práticas	Laboratoriais	Seminários	Tutoriais	Outras	Total
0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00

Total Horas da UC (Semestrais)

Total Horas de Contacto
42.00

Horas totais de Trabalho
98.00

Docente responsável (nome / carga lectiva semanal)

Pedro Miguel Gomes Januário

Outros Docentes (nome / carga lectiva semanal)

Pedro Miguel Gomes Januário 15.00 horas

Luís Miguel Cotrim Mateus 3.00 horas

Objetivos de aprendizagem (conhecimentos, aptidões e competências a desenvolver pelos estudantes)

1. Abordar a geometria como factor de optimização da relação entre a as propriedades dos materiais, as configurações dos sistemas construtivos e os processos de fabricação de base digital em Arquitectura.
2. Definir critérios de classificação das estruturas geométricas (linhas, superfícies, sólidos).
3. Estudar as estruturas geométricas em função dos parâmetros que permitem a sua definição e manipulação.

4. Estudar vários grupos de transformações geométricas compreendendo os invariantes de cada um.
5. Efectuar uma abordagem algorítmica a problemas específicos de índole projectual.

Conteúdos Programáticos / Programa

1. Arquitectura e morfogénese (Novos paradigmas da arquitectura e do urbanismo; A geometria como escala operatória da estruturação das formas e dos espaços; a integração entre geometria-materiais-desempenho; o corte e assemblagem de materiais e componentes construtivos)
2. Estruturas geométricas
 - Definições, critérios de classificação, sistematização e aplicações técnico-funcionais, na arquitectura e no urbanismo
 - Da representação computacional das superfícies geométricas através dos seus elementos de definição (Poliedros, Superfícies regradas planificáveis, Superfícies regradas empenadas, Superfícies de revolução, Superfícies não regradas, Superfícies NURBS)
 - Transformações geométricas (Intersecções múltiplas e concordâncias múltiplas, Transformações euclidianas, Transformações de escala, Transformações afins e projectivas, Transformações topológicas)
3. Modelação paramétrica e noção de sistema formal (Programação visual: interface Grasshopper para Rhinoceros; expressões simbólicas, estruturas de controlo, funções cíclicas, estruturas de dados)
4. Noções gerais sobre fabricação digital (métodos aditivos, métodos substractivos).

Demonstração da coerência dos conteúdos programáticos com os objectivos de aprendizagem da unidade curricular

INSTRUMENTAIS:

Competência em análise e síntese; Competência em organização e planificação; Conhecimentos de informática relativos ao âmbito do estudo; Competência em gestão da informação; Competência para resolver problemas; Capacidade de decisão

PESSOAIS:

Competência em trabalho de grupo; Competência em raciocínio crítico; Compromisso ético

SISTÉMICAS:

Adaptabilidade a novas situações; Criatividade; Preocupação com a qualidade; Competência em aplicar na prática os conhecimentos teóricos; Competência em autocritica e auto-avaliação; Competência em investigar

Metodologias de ensino (avaliação incluída)

A submissão dos trabalhos será sempre no 1º domingo de cada mês, via email, excepto a submissão final

A avaliação terá por base o somatório ponderado dos exercícios elaborados ao longo do semestre em função:

- da sua complexidade
- do acompanhamento e do desenvolvimento dos exercícios
- da qualidade arquitetónica das soluções propostas
- da capacidade discursiva acerca dos exercícios e matérias dadas (verificado através da apresentação de um relatório)
- da assiduidade dos alunos (é recomendado uma assiduidade superior a 85%)

Os alunos com assiduidade inferior a 85% ou com avaliação contínua inferior a 7,00 valores, serão automaticamente excluídos do Exame de Época Normal

O exame de Época Normal consistirá na (re)apresentação e melhoria dos exercícios desenvolvidos durante o semestre

O exame de Época de Melhoria e Recurso consistirá na resolução de um exercício específico para o efeito

Demonstração da coerência das metodologias de ensino com os objectivos de aprendizagem da unidade curricular

Bibliografia Principal

- ASCENZI, F. Izquierdo (2000). "Geometria Descriptiva Superior y Aplicada", Madrid, Editorial Paraninfo.
- CECCATO, Cristiano (2010). The Master-Builder-Geometer in "Advances in Architectural Geometry", SpringerWienNewYork, pp. 9-14.
- GHYKA, Matila C. (1978). "El número de oro" (3rd edition). Barcelona, Poseidon.
- GHYKA, Matila C. (1983). "Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes" (3rd edition). Barcelona, Poseidon.
- ISSA, Raja (2010). "Essential Mathematics for computational Design" (2nd Edition). Robert McNeel & Associates (disponible on-line).
- PAYNE, Andrew, ISSA, Raja (2009). "The Grasshopper Primer" (2nd Edition). Robert McNeel & Associates (disponible on-line).
- POTTMANN H, ASPERL A, HOFER M, KILIAN A. (2007). "Architectural Geometry". Bentley Institute Press.
- TEDESCHI, Arturo (2011). "Parametric Architecture with Grasshopper". Villa d'Agri, Edizioni Le Penseur (disponible on-line)

Bibliografía Complementar

- BAHAMÓN, A., PÉREZ, P. (2008). "Analogías entre o mundo animal e a Arquitectura contemporânea". Dinalivro.
- BROUG, Eric (2008). "Islamic Geometric Patterns". London, Thames & Hudson
- MITCHELL W, McCULLOUGH, M. (1995). "Digital Design Media" (2nd Edition). Van Nostrand Reinhold. New York. (disponible on-line).

PALACIOS, J. Carlos (2003) Trazas y Cortes de Cantería en el renacimiento español. Munillalera.



CURRICULAR UNIT FORM

Curricular Unit Name

201324013 - Geometric and Generative Modelling

Type

Obrigatória

Academic year

2019/20

Degree

MI Arquitetura - Esp.Arq

Cycle of studies

2º

Year of study/ Semester

3.50 ECTS

Lecture language

Português ,Inglês

Periodicity

semestral

Prerequisites

Unit credits

4º / 1º

Scientific area

Desenho, Geometria e Computação

Contact hours (weekly)

Theoretical	Practical	Theoretical-practicals	Laboratory	Seminars	Tutorial	Other	Total
0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00

Total CU hours (semestrial)

Total Contact Hours
42.00

Total workload
98.00

Responsible teacher (name /weekly teaching load)

Pedro Miguel Gomes Januário

Other teaching staff (name /weekly teaching load)

Pedro Miguel Gomes Januário 15.00 horas
Luís Miguel Cotrim Mateus 3.00 horas

Learning objectives (knowledge, skills and competences to be developed by students)

1. Addressing geometry as a factor in optimizing the relationship between the material properties, the settings of building systems and digital based fabrication processes in architecture.
2. Define criteria for the classification of geometric structures (lines, surfaces, solids).
3. Study the geometrical structures on the basis of parameters that allow their definition and manipulation.
4. Studying the various groups of geometric transformations comprising the invariants of each of them.
5. Making an algorithmic approach to specific design based problems

Syllabus

1. Architecture and morphogenesis (New paradigms of architecture and urbanism; geometry as an operative factor structure of shapes and spaces; integration between geometry-material-performance, cutting and assembly of materials and building components)
2. geometric structures
 - Definitions, classification criteria, sistematization and technical-functional applications in architecture and urbanism
 - From the computational representation of geometric surfaces through its definition elements (Polyhedra, developable ruled surfaces, warped ruled surfaces, surfaces of revolution, NURBS surfaces)
 - Geometric transformations (multiple intersections and multiple tangencies, Euclidean transformations, transformations of scale, Affine and projective transformations, topological transformations)
3. Notion of parametric modeling and formal system (visual programming: interface to Rhinoceros Grasshopper; symbolic expressions, control structures, functions, cyclic data structures)
4. Getting acquainted with digital fabrication techniques and methods (additive methods, subtractive methods).

Demonstration of the syllabus coherence with the curricular unit's learning objectives

INSTRUMENTS:

Competence in analysis and synthesis; Competence in organization and planning; Computer literacy related to the scope of the study; Competence in information management; Problem-solving skills; Decision-making ability

PERSONAL:

Competence in group work; Skills in critical thinking; Ethical Commitment

SYSTEMIC:

Adaptability to new situations; Creativity; Concern about quality; Competence in applying theoretical knowledge in practice; Competence in self-criticism and self-evaluation; Competence to investigate

Teaching methodologies (including evaluation)

The work submission will be always on the 1st Sunday of each month, by email, except the final submission

Evaluation will be based in the average sum of the exercises developed throughout the semester, according to:

- the complexity of the exercises
- monitoring the development of the exercises
- quality of the architectonic solutions proposed
- discursive capacity about the exercises and subjects (verified by submitting a report)
- attendance (we strongly recommend an attendance higher than 85%)

Students with attendance below 85% or less than 7,00 values continuous assessment will be automatically excluded from the Regular Season examination

The "Época Normal" (Regular Season) exam will consist of the (re)presentation and improvement of exercises developed during the semester.

The "Época de Recurso e Melhoria" exam will consist in developing a specific exercise for that purpose.

Demonstration of the coherence between the Teaching methodologies and the learning outcomes

Main Bibliography

- ASCENZI, F. Izquierdo (2000). "Geometria Descriptiva Superior y Aplicada", Madrid, Editorial Paraninfo.
- CECCATO, Cristiano (2010). The Master-BUILDER-Geometer in "Advances in Architectural Geometry", SpringerWienNewYork, pp. 9-14.

- GHYKA, Matila C. (1978). "El número de oro" (3rd edition). Barcelona, Poseidon.
- GHYKA, Matila C. (1983). "Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes" (3rd edition). Barcelona, Poseidon.
- ISSA, Raja (2010). "Essential Mathematics for computational Design" (2nd Edition). Robert McNeel & Associates (disponible on-line).
- PAYNE, Andrew, ISSA, Raja (2009). "The Grasshopper Primer" (2nd Edition). Robert McNeel & Associates (disponible on-line).
- POTTSMANN H, ASPERL A, HOFER M, KILIAN A. (2007). "Architectural Geometry". Bentley Institute Press.
- TEDESCHI. Arturo (2011). "Parametric Architecture with Grasshopper". Villa d'Agri, Edizioni Le Pensur (disponible on-line)

Additional Bibliography

- BAHAMÓN, A., PÉREZ, P. (2008). "Analogías entre o mundo animal e a Arquitectura contemporânea". Dinalivro.
- BROUG, Eric (2008). "Islamic Geometric Patterns". London, Thames & Hudson
- MITCHELL W, McCULLOUGH, M. (1995). "Digital Design Media" (2nd Edition). Van Nostrand Reinhold. New York. (disponible on-line).

PALACIOS, J. Carlos (2003) Trazas y Cortes de Canteria en el renacimiento español. Munillalera.

Anexo III – Ficha de unidade curricular da disciplina MPPDD



FICHA DE UNIDADE CURRICULAR

Unidade Curricular

201313047 - MODELAÇÃO PARAMÉTRICA E PROTOTIPAGEM DIGITAL EM DESIGN

Tipo

Obrigatória

Ano lectivo

2019/20

Curso

Lic Design

Ciclo de estudos

1º

Créditos

3.50 ECTS

Idiomas

Português

Periodicidade

semestral

Pré requisitos

Ano Curricular / Semestre

3º / 1º

Área Disciplinar

Desenho, Geometria e Computação

Horas de contacto (semanais)

Teóricas	Práticas	Teórico práticas	Laboratoriais	Seminários	Tutoriais	Outras	Total
0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00

Total Horas da UC (Semestrais)

Total Horas de Contacto

42.00

Horas totais de Trabalho

98.00

Docente responsável (nome / carga lectiva semanal)

Pedro Miguel Gomes Januário

Outros Docentes (nome / carga lectiva semanal)

Pedro Miguel Gomes Januário 6.00 horas

Objetivos de aprendizagem (conhecimentos, aptidões e competências a desenvolver pelos estudantes)

Esta unidade curricular tem como objetivo principal explorar o potencial criativo e conceptual da integração da Biomimética, da Morfogénese Digital, da Prototipagem Digital e do Desenho Paramétrico no Projeto.

E tem como objetivos secundários:

- dar a conhecer os diferentes processos de prototipagem digital, as materialidades associadas e as suas características físicas e potencial estético e conceptual aplicado ao Design de produtos;

- integrar a Biomimética como elemento inspirador a nível conceptual e como repositório de soluções projetuais ;
- potenciar e desenvolver a capacidade de desconstrução e abstração geométrica da natureza;
- introduzir e estimular a integração do Desenho Paramétrico nos processos generativos (Morfogénese Digital) de superfícies complexas a prototipar;
- transportar os saberes tradicionais para o universo digital afim de promover a inovação e o valor acrescento.

Conteúdos Programáticos / Programa

1-Processos de Prototipagem Digital

- Introdução à Prototipagem e à Fabricação Digital
- Processos Subtrativos e Aditivos
- Materialidades e Propriedades

2-Biomimética aplicada ao Design de produto

- Princípios associados à Biomimética
- Estratégias de atuação

3-Morfogénese Digital (Modelação avançada)

- Ponto, Curva, Splines e Nurbs
- Superfícies regradas
- Superfícies dupla curvatura
- Edição e Redefinição de superfícies por pontos
- Paneling Tools

4-Desenho Paramétrico

- Integração de algoritmos paramétricos de geração e manipulação de curvas no espaço
- Integração de algoritmos paramétricos de geração de superfícies e de form-finding
- Integração de algoritmos paramétricos para a validação de modelos para prototipagem digital
- Integração de algoritmos de planificação de modelos para prototipagem digital

5-Síntese Final

- Conceção, desenvolvimento e modelação aplicada segundo a protipagem digital por processos subtrativos
- Conceção, desenvolvimento e modelação aplicada segundo a protipagem digital por processos aditivos

Demonstração da coerência dos conteúdos programáticos com os objectivos de aprendizagem da unidade curricular

Instrumentais:

Competência em análise e síntese; Competência em organização e planificação; Conhecimentos de informática relativos à prototipagem, ao desenho paramétrico e à modelação avançada; Competência em gestão da informação; Competência para resolver problemas; Capacidade de decisão;

Pessoais:

Competência em trabalho de grupo; Competência em raciocínio crítico; Compromisso ético; Adaptabilidade a novas situações; Criatividade; Iniciativa e espírito empreendedor; Preocupação com a qualidade

Sistémicas:

Preocupação com desenvolvimento sustentado; Competência em aplicar na prática os conhecimentos teóricos ; Competência em planear e gerir; Competência em autocrítica e auto-avaliação; Competência em investigar

Metodologias de ensino (avaliação incluída)

A submissão dos trabalhos será sempre no 1º domingo de cada mês, via email, excepto a submissão final

A avaliação terá por base o somatório ponderado dos exercício elaborados ao longo do semestre em função:

- da sua complexidade, do acompanhamento e do desenvolvimento dos exercícios
- da qualidade arquitetónica das soluções propostas
- da capacidade discursiva acerca dos exercícios e matérias dadas (verificado através da apresentação de um relatório)

- da assiduidade dos alunos (é recomendado uma assiduidade superior a 85%)

Os alunos com assiduidade inferior a 85% ou com avaliação contínua inferior a 7,00 valores, serão automaticamente excluídos do Exame de Época Normal

O exame de Época Normal consistirá na (re)apresentação e melhoria dos exercícios desenvolvidos durante o semestre

O exame de Época de Melhoria e Recurso consistirá na resolução de um exercício específico para o efeito

Demonstração da coerência das metodologias de ensino com os objectivos de aprendizagem da unidade curricular

-

Bibliografia Principal

- ANDRADE, Gabriela Rabelo (2014). Biomimética no Design: abordagens, limitações e Contribuições para o Desenvolvimento de produtos e tecnologias. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Minas gerais UEMG, Belo Horizonte (disponível em: http://anapaulanasta.com/wp-content/uploads/2014/12/Dissertação_Gabriela_Andrade.pdf)
- BAHAMÓN, A., PÉREZ, P. (2008). "Analogias entre o mundo animal e a Arquitectura contemporânea". Dinalivro.
- ISSA, Raja (2010). "Essential Mathematics for computational Design". Robert McNeel & Associates (disponível on-line).
- PAYNE, Andrew, ISSA, Raja (2009). "The Grasshopper Primer" (2nd Edition). Robert McNeel & Associates (disponível on-line).
- TEDESCHI, Arturo (2011). "Parametric Architecture with Grasshopper". Villa d'Agri, Edizioni Le Penseur (disponível on-line)

WOODBURY, Robert (2010). "Elements of parametric design". Routledge.

Bibliografia Complementar

GHYKA, Matila C. (1983). "Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes" (3rd edition). Barcelona, Poseidon.



CURRICULAR UNIT FORM

Curricular Unit Name

201313047 - Parametric Modelling and Digital Prototyping in Design

Type

Obrigatória

Academic year

2019/20

Degree

Lic Design

Cycle of studies

1º

Year of study/ Semester

3.50 ECTS

Lecture language

Português

Periodicity

semestral

Prerequisites

Unit credits

3º / 1º

Scientific area

Desenho, Geometria e Computação

Contact hours (weekly)

Theoretical	Practical	Theoretical-practicals	Laboratory	Seminars	Tutorial	Other	Total
0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00

Total CU hours (semestrial)

Total Contact Hours

42.00

Total workload

98.00

Responsible teacher (name /weekly teaching load)

Pedro Miguel Gomes Januário

Other teaching staff (name /weekly teaching load)

Pedro Miguel Gomes Januário 6.00 horas

Learning objectives (knowledge, skills and competences to be developed by students)

This course unit aims to explore the creative and conceptual potential of the integration of Biomimetics, Digital Morphogenesis, Digital Prototyping and Parametric Design in the Project.

Moreover, its second goals are:

- make known the different processes of digital prototyping, the associated materialities and their formal characteristics and the aesthetic and conceptual potential applied to Product Design;
- to integrate Biomimetics as an inspiring element at a conceptual level and as a repository of design solutions;
- potentiate and develop the capacity for deconstruction and geometric abstraction of nature;

- introduce and stimulate the integration of Parametric Design in the generative processes (Digital Morphogenesis) of complex surfaces to prototype;
- transport traditional knowledge to the digital universe to promote innovation and added value.

Syllabus

- 1-Digital Prototyping Processes
 - Introduction to Prototyping and Digital Fabrication
 - Subtractive Processes
 - Additives Processes
- 2-Biomimetics Applied to Product Design
 - Principles associated with Biomimetics
 - Strategies of action
- 3-Digital Morphogenesis (Advanced Modeling)
 - Point, Curve, Splines, and Nurbs
 - Regulated surfaces
 - Double curvature surfaces
 - Editing and Redefining Surfaces by Points
 - Paneling Tools
- 4-Parametric Design
 - Integration of parametric algorithms of generation and manipulation of curves in the space
 - Integration of parametric algorithms for surface generation and form-finding
 - Integration of parametric algorithms for the validation of models for digital prototyping
 - Integration of modeling algorithms for digital prototyping
- 5-Digital Prototyping
 - Design, development, modeling applied according to digital prototyping by subtractive processes
 - Design, development, modeling applied according to digital prototyping by additive processes

Demonstration of the syllabus coherence with the curricular unit's learning objectives

Instrumentals:

Competence in analysis and synthesis; Competence in organization and planning; Computer skills related to prototyping, parametric drawing and advanced modeling; Competence in information management; Problem-solving skills; Decision-making capacity

Personal:

Competence in work group; Skills in critical thinking; Ethical commitment; Adaptability to new situations; Creativity; Initiative and entrepreneurial spirit; Concern about quality

Systemic:

Concern with sustainable development; Competence in applying theoretical knowledge in practice; Competence in planning and managing; Competence in self-criticism and self-evaluation; Competence to investigate

Teaching methodologies (including evaluation)

The work submission will be always on the 1st Sunday of each month, by email, except the final submission

Evaluation will be based in the average sum of the exercises developed throughout the semester, according to:

- the complexity of the exercises
- monitoring the development of the exercises
- quality of the architectonic solutions proposed
- discursive capacity about the exercises and subjects (verified by submitting a report)
- attendance (we strongly recommend an attendance higher than 85%)

Students with attendance below 85% or less than 7,00 values continuous assessment will be automatically excluded from the Regular Season examination

The "Época Normal" (Regular Season) exam will consist of the (re)presentation and improvement of exercises developed during the semester.

The "Época de Recurso e Melhoria" exam will consist in developing a specific exercise for that purpose.

Demonstration of the coherence between the Teaching methodologies and the learning outcomes

-

Main Bibliography

- ANDRADE, Gabriela Rabelo (2014). Biomimética no Design: abordagens, limitações e Contribuições para o Desenvolvimento de produtos e tecnologias. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Minas gerais UEMG, Belo Horizonte (disponível em: http://anapaulanasta.com/wp-content/uploads/2014/12/Dissertação_Gabriela_Andrade.pdf)
 - BAHAMÓN, A., PÉREZ, P. (2008). "Analogias entre o mundo animal e a Arquitectura contemporânea". Dinalivro.
 - ISSA, Raja (2010). "Essential Mathematics for computational Design". Robert McNeel & Associates (disponível on-line).
 - PAYNE, Andrew, ISSA, Raja (2009). "The Grasshopper Primer" (2nd Edition). Robert McNeel & Associates (disponível on-line).
 - TEDESCHI, Arturo (2011). "Parametric Architecture with Grasshopper". Villa d'Agri, Edizioni Le Penseur (disponível on-line)
- WOODBURY, Robert (2010). "Elements of parametric design". Routledge.

Additional Bibliography

GHYKA, Matila C. (1983). "Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes" (3rd edition). Barcelona, Poseidon.

Anexo IV – Artigo publicado no evento eCAADe Berlin 2020

Design collaboration towards constructibility in parametric design process

a design experiment with architecture students

Verner Monteiro¹, Pedro Januário², Máisa Veloso³

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte; Instituto Federal do Rio Grande do Norte ²Universidade de Lisboa ³Universidade Federal do Rio Grande do Norte
^{1,2,3}{monteiroverner|arq.pedro.januário|maisaveloso}@gmail.com

The use of parametric modeling in architectural design processes has made possible the creation of novel complex-shaped projects, but also launched new materialization challenges. This hard task addressed to a relevant need to comprehend the impact of constructibility on parametric design teaching. We analyzed how multicultural collaborative teams of students introduced construction constraints in parametric design processes, in an European architecture school. The method consisted of two design experiments with architecture students who designed a pavilion, starting from constraints such as time, material and pre-existences. The results addressed that the introduction of construction constraints since the early conceptual design stages conditioned the architectural shape, but also optimized time, decreased rework, and helped on decision-making. Despite the multiculturality, the students' lack of knowledge in construction methods indicated a high need for integration with engineering students and industry partners since graduation.

Keywords: *Parametric Design, Constructibility, Collaborative Design, Design Process*

INTRODUCTION

This paper explores how architecture shifts from “digital to material” by analyzing collaborative parametric design processes and it was focused on building constructibility in educational context.

With the advent of parametric modeling, architects start to create unprecedented architectural shapes (Kolarevic 2008). But along with the freedom to create novel architectural shapes, new materialization challenges arose. The combination of managing

the complexity of the parametric design media and the constructibility of the building demands collaborative work, as recommends the New Structuralism manifest (Oxman and Oxman 2010).

The concern with materialization in the digital age was brought to discussion by authors such as Antoine Picon (Picon 2004), who affirmed that the development of computational design is often presented as a challenge to physical aspects and construction technologies. The author attests that computer-

based design often appears to neglect the material dimension of architecture, its intimate relation with properties like weight, thrust, and resistance. He indicates that on a computer screen, forms seem to float freely, without constraint other than those imparted by the program and by the designer's imagination.

In this direction, digital media and emerging technologies are rapidly expanding what we conceive to be formally, spatially, and materially possible (Iwamoto 2009). Digital practices have the potential to narrow the gap between representation and building, affording a hypothetically seamless connection between designing and making in architecture. Many remarkable buildings such as Gehry's Guggenheim Bilbao Museum and Walt Disney Concert Hall are samples of this new way of designing and materializing architecture.

Designing those buildings demands expertise and hours of planning and requires a collaborative team of designers and consultants. This context addresses that complex architectural shape needs to emerge concomitantly to a structural design proposal. This may decrease the risk of unfeasibility, especially when the shape defines the architecture itself (Cordeiro and Rocha 2017).

The demand for materializing contemporary architecture made emerge specialized companies offering consultation in design and fabrication processes (Celani 2017; Klinger 2008; Kolarevic 2008). Those companies act in the design process during conceptual and/or late design stages. When acting later in the process, it contradicts what recommends the New Structuralism manifest (Oxman and Oxman 2010), which claims for a high integration between architects and engineers since the early conceptual design stages.

Regarding the architectural education scenario, several organizations and associations around the world support the efforts of academic programs to create and implement an effective new curriculum that brings together students from multiple disciplines, industry professionals, and advanced design technologies to learn how to address practical design

challenges (Nicknam, Bernal, and Haymaker 2013). However, the teachers' motivation is not enough to make multidisciplinary happen, and most architecture schools are not at this level of collaboration.

Many authors (Schnabel 2004; Gallas et al. 2015; Nicknam, Bernal, and Haymaker 2013) state ways of teaching parametric design with specific methodologies. Most of them mention the phases of identification of possible design parameters, creation of parametric relations, and selection of better solution in a range of alternatives, close to what Bryan Lawson (Lawson 2005) calls analysis, synthesis, and evaluation. Besides this methodologic base, professors should integrate a computational approach both theoretical and practical allowing the student to acquire culture in contemporary architectural practices (Gallas et al. 2015).

Collaboration is an initiative defended as a consensus to both practice and academia to parametric design implementation. Collaborative design consists of parallel expert actions, bracketed by joint activity of negotiation and evaluation (Kvan 2000). Negotiation and evaluation, as moments of interaction, can drive the design solution differently depending on the capability of persuasion/leadership of each designer. Types of leadership can be determinant to teamwork. Vertical leadership may be interpreted as an influence on team processes while shared leadership is a team process where leadership is carried out by the team as a whole (Ensley, Hmieleski, and Pearce 2006).

Hybridity can also play an important role in the design process of collaborative teams. At the practical teaching of the parametric, the crux lies in the transition from paper sketch to the parametric structure (Gallas et al. 2015), indicating the potential of using multi-media and multi-domain competences (Lebahar 1999).

This leads to raise the question of "how constructibility impacts the parametric design process in educational context?" As a hypothesis, we believe that in the collaborative parametric design process, the construction constraints assume the role of rad-

ical constraints (Lawson 2005), and lead the design and construction process more easily. We developed a design experiment with architecture students, that along with other methodological steps of an ongoing Ph.D. research, helped to confirm the hypothesis.

We aim to analyze how the constructibility constraints were converted into design actions and how it impacted the parametric design process.

METHODOLOGY

Two design experiments served as base for the study and have been conducted throughout the academic year 2019-2020 during the four credits course named Geometric and Generative Modeling, within the framework of a two-year master's program for architecture of the University of Lisbon, Portugal. In total eight *Erasmus* students from five different nationalities (Poland, Japan, England, Morocco, and France) divided in 2 groups have participated and were supervised by three design professors.

Instead of grouping students from other departments and industry partners, we grouped only architecture students to understand how different cultures could show a variety of expertise in constructibility during the design process. Thus, the collaborative teams were multicultural instead of multidisciplinary.

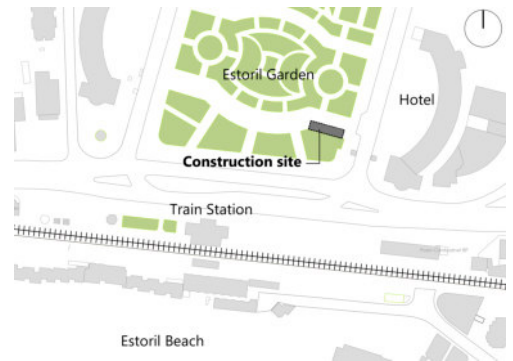
The methodology of the experiments consisted of two phases: **training** and **designing** subdivided into specific stages. The training phase started with the use of *Rhinoceros* software, shifted to the use of its plug-in, *Grasshopper* and then went to the add-ons *Kangaroo* and *Karamba3D*. The training phase strategy was based on exercises from the simple to the complex shape manipulation. Students modeled simple shapes to understand surface manipulation and Boolean operations. They also created complex shapes by exploring the morphogenesis of cephalopods (Figure 1).

Students then started to work with simple parametric geometries to understand how rules and parameters could be included and manipulated. This was important for the phase of **designing** to give

them the idea of generation of design alternatives. The last training class explored samples of physical behavior, such as the simulation of origami movements and structural analysis of a beam (Figure 2).

For the **designing** phase the students were grouped according to criteria like assiduity, potential of interaction and skills in computational tools *Rhinoceros*, *Grasshopper*, *Kangaroo* and *Karamba3D*, based on the observation of their performance during the **training** phase.

An architectural design exercise was launched to be developed in four weeks. We asked students to design a complex-shaped pavilion to serve both as a covered path to pedestrians and as a place to stay and contemplate the landscape. The final design should cover part of the internal sidewalks of Jardim do Estoril (Figure 3). The construction site is surrounded by a Casino, a Hotel, a train station, and the beach, that can be reached by an underground tunnel. It is possible to observe the beach from the construction site due to its high ground level. This urban context may affect the design solution.



The design team had to consider constraints such as pre-existence (topography, sidewalks, pavement, and trees), constructibility (foundations placement, material, optimization, assembly, time of construction) and the use of parametric modeling as a mandatory design media. The chosen material was wooden pallets available at the University.

Figure 3
Construction site.

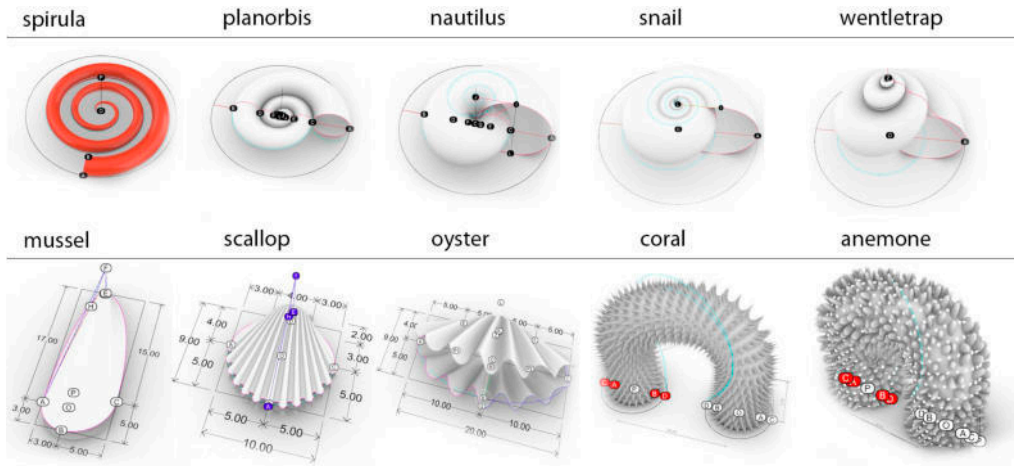


Figure 1
Rhinoceros training.

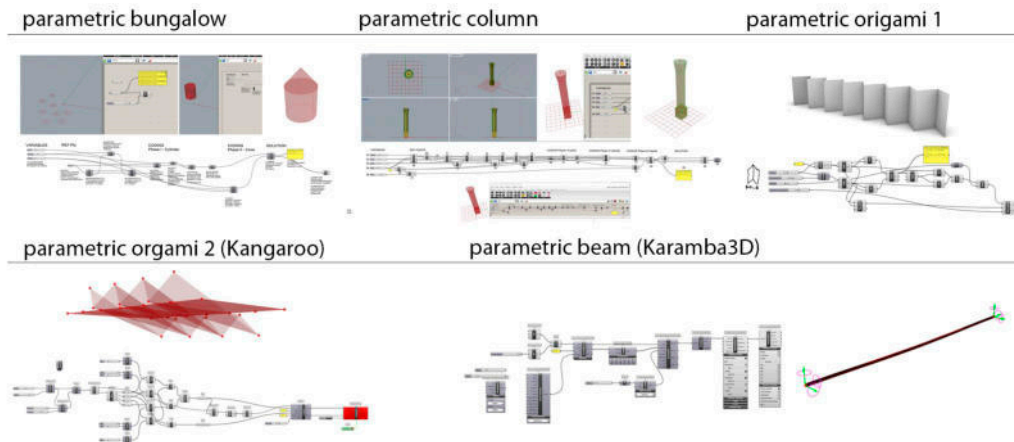


Figure 2
Grasshopper training.

THE PARAMETRIC DESIGN PROCESSES

Eight students in total were divided into two working groups (group 1 and group 2) and the number of participants was four by group. Students had a moment of self-introduction, once they never designed together before. Every group should follow three

mandatory design actions:

1. Study of design references;
2. Creation of a design concept;
3. Creation of code logic.

The subsequent design actions would be selected freely, so the groups could determine which resources would be more suitable to their design. We will describe next which free actions took place, highlighting some of them according to determinant phases of the process.

Group 1: Multiuse Freeform Shape Pavilion

Two polishes, an english and a moroccan student joined group 1. English student had a previous experience with parametric modeling, and this helped with the first contact with the design problem. Experts users can reduce time spend on the parametric model generation and give more focus on the design activities (Gallas et al. 2015).

This also caused a dispute for vertical leadership that somehow interfered with the integration between the designers. Therefore, the other students understood that after each colleague co-operates on a few clusters of contributions they could collaborate discussing and negotiating the final solution (Kvan 2000). During the process, shared leadership took place.

The free design actions adopted by students was mass study with hand sketches and geometric modeling, interpretation of construction constraints with sketches, and coding in *Grasshopper* (Figure 4).

Design action	Type	Description
1	Mandatory	Study of design references
2	Mandatory	Definition of the design concept
3	Mandatory	Creation of the <i>Grasshopper</i> code logic
4	Free	Mass study with hand sketches
5	Free	Mass study with geometric modeling
6	Free	Interpretation of constructive constraints with sketches
7	Free	Coding with <i>Grasshopper</i>
*The number attributed to the actions does not denotes a sequence, due to the complexity and uncertainty of a design process.		

In the first week, students surveyed the design references and defined the design concept. It was a free-form and organic structure that emerged from a combination of three types of modules: entire pallets,

half pallets, and quarter pallets. They discussed how those modules could be arranged, mainly regarding the future code assemblage and the structural joints (Figure 5).

In the week after students concerned about four main design problems: movement of people under the structure, the design shape, the pallets overlapping (to create the joints), and the distribution of the structural forces distributed through the entire construction. The designers then worked separately in co-operation: as three of them worked on hand sketching and geometric modeling, the other colleague made the first attempts on coding. Therefore, it was only in the third week that they started to have a well-planned code. The students used a code logic based on the construction of a non-parametric curve divided into parametric points, which was turned into circles and ellipses. Those curves were lofted to generate a surface, with a cloud of points inside of it. These clouds of points had a fixed distance, which was the vertices of an outer bounding box of the pallet.

On week four the group 1 witnessed their major impasse: the intersection between the cloud of points and the surface was not matching the pallets, generating a constructibility issue on the design process. This led them to abandon the usage of three types of modules, deciding to apply only the quarter pallet to the final design. By doing this and reinterpreting the whole code, it was also necessary to study the logic of *Grasshopper* Data Tree, as well as list managing, in order to be able to reorganize the cloud of points and finish the design. Both constructibility and computer constraints conditioned the parametric design process, confirming the launched hypothesis.

The design solution was a free-form surface filled with quarter pallet modules (Figure 6). Despite concern about the trespassing of the structure to sustain and connect the modules to each other, the group did not explain how the connection between the pallets could be solved, and this could affect the final shape. This was a **constructibility** issue, related to

Figure 4
Design actions of
Group 1.

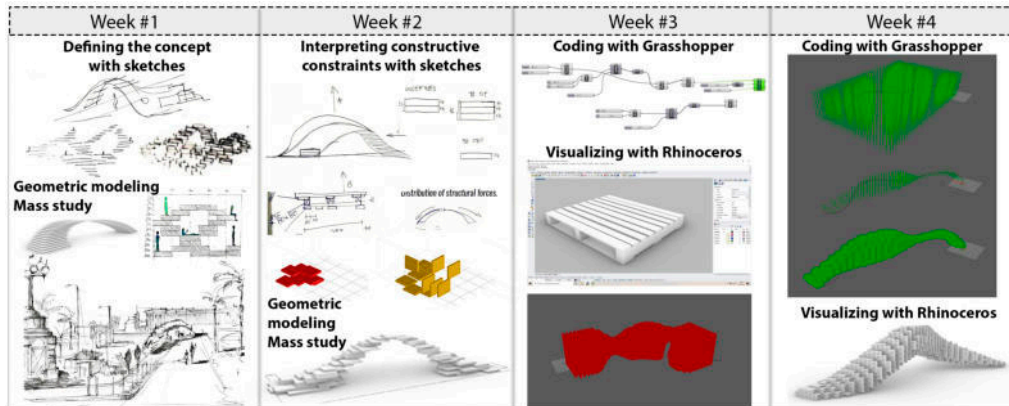


Figure 5
Design actions
summary per week
for Group 1.

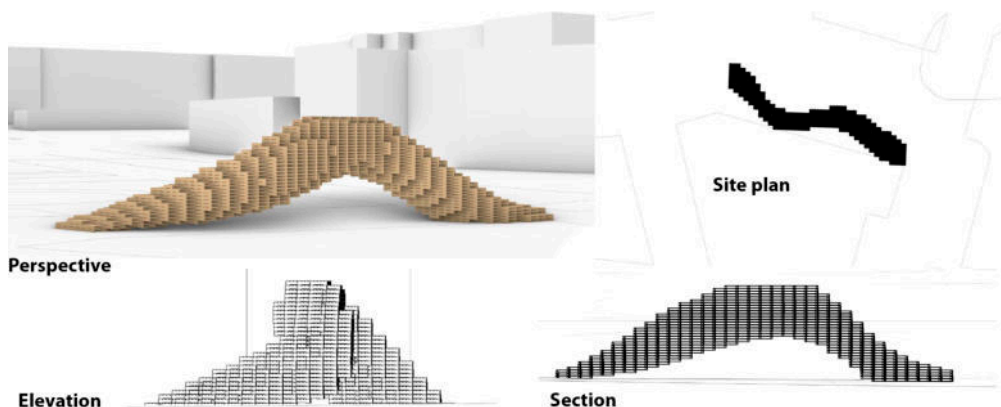


Figure 6
Final
representations of
Group 1

structural design, that would have to present a feasible solution before goes further on construction documents phase, and subsequently, to the construction site.

Professors acted both as consultants in the parametric design tool and provoking when a constructive solution was not properly solved, due to the lack of multidisciplinary.

Group 2: Covered Hallway Pavilion

This group was composed of two japaneses, a polish and a French student, and none of them had experienced parametric design or parametric tools before. As a possible consequence novice users modeling activity is expected to be considered as an additive constraint that influences the design process (Gallas et al. 2015).

The interaction between students happened more fluidly than Group 1, leading to a more

collaborative than co-operative environment (Kvan 2000). They adopted five free design actions: mass study with hand sketches, study of spatial relations both with hand sketching and physical scaled models, zoning and viewing studies, and coding with *Grasshopper* (Figure 7).

Figure 9
Design actions of
Group 2.

Design action	Type	Description
1	Mandatory	Study of design references
2	Mandatory	Definition of the design concept
3	Mandatory	Creation of the <i>Grasshopper</i> code logic
4	Free	Mass study with hand sketches
5	Free	Study of spatial relations and constructive constraints with scaled models
6	Free	Zoning and viewing studies
7	Free	Study of spatial relations, constructive constraints, and mass using hand sketches
8	Free	Coding with <i>Grasshopper</i>
*The number attributed to the actions does not denotes a sequence, due to the complexity and uncertainty of a design process.		

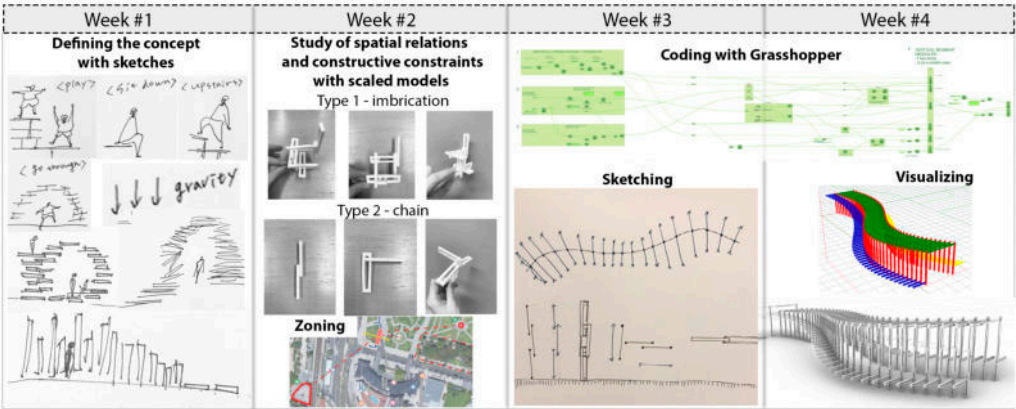
In the first week, the students mainly discussed design concept and decided to use a slice of the wood pallet as a basic module, that could be multiplied to generate a parametrically controlled chain. This would give them the so desired movement as well as the design alternatives. The second week was deci-

sive to incorporate, with physical models, the type of movements that would take place in the entire geometry, relating this with zoning studies. The following weeks were dedicated to plan and develop the *Grasshopper* code, always going back to the sketches and physical models to validate how the movement constraints would take place.

The architecture students conceived their covered hallway pavilion based on curves that were generated from a referential point attractor, that works like a magnet and attracts the rest of the geometry. The pallets were decomposed to generate a module that can be compared to a chain link, which gets tighten or loosen depending on the location of the referential point attractor. As far as the referential point goes away from the main geometry, the chain gets loosen, and when the opposite occurs, the point gets closer. The group coordinated the correct limits of these movements on the *Grasshopper* definition, respecting the constraints of the chain links, observed during the stage of study spatial relations (Figure 8). This denoted the importance of hybridity in the parametric design process (Gallas et al. 2015).

Students had two impasses that stick the process. The first one occurred after defining the concept with sketches. They did not know how to predict the curved effect, mainly regarding the relations between the pallet modules. One of them had the

Figure 7
Summary of design
actions of Group 2
during the four
weeks of the design
experiment.



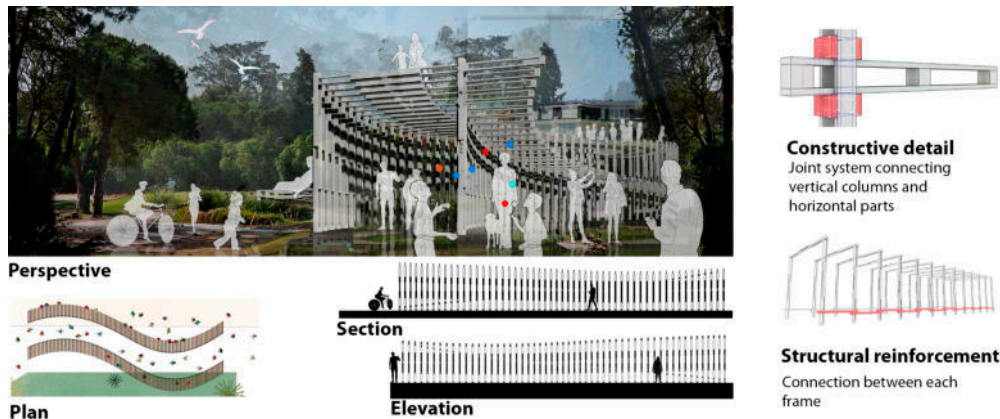


Figure 8
Final
representations of
Group 2.

idea to test the connections between the modules by making physical models with waste of Styrofoam. Students defined the types of spatial relations as imbrication and chain. The second one occurred during the coding stage. They had to reinterpret the movements by observing the physical models and spent a week trying to find the lightest way to assemble the *Grasshopper* definition.

Group 2 delivered the final representations of the covered hallway pavilion, that was made with segments of pallets as modules (Figure 9). The final product presented a solution to the connection issues that were problematic during the design process and could compromise the building constructibility. Until the last week of the course, these elements were floating on the horizontal plane, without any structural support, reinforcement, or connection.

The professors had to act as guiders in some decisive moments of the design process. They interacted with students as building construction consultants or experts in parametric design tools, but always as provokers, not as designers.

RESULTS AND DISCUSSION

The criteria alignment to subsidy analysis and evaluation of the design processes considered the equal number of participants with balanced skills as well

as the same design constraints and construction site. Both groups delivered final designs with a good interpretation of the architectural design statement.

The categories considered critical during the total process of design-through-production are research, fabrication, consultation, and software and coding (Klinger 2008). Those categories were adapted to this paper and became **analytical categories**, that combined the idea of other authors - such as design study, materiality, constructibility, and collaborative design - to reach the following proposed categories: "design problem", "constructibility", "collaborative design" and "design media" (Figure 11).

Students of both groups made a proper research in every step of the process through and reflected on them through the design actions, especially during the first week. There was a constant switching of strategies observed on the design actions to find a suitable solution for each design problem.

Construction constraints associated with parametric modeling challenges have made emerge the main design problems and brought impact to the process and final product. The lack of knowledge and skills about parametric design could maybe potentialize the construction constraints with more latency (Gallas et al. 2015).

Figure 10
Description of the
proposed analytical
categories.

Klinger (2008) categories	Research	Fabrication	Consultation	Software and coding
Critical topics during the total process of design-through-production	- Research related to design problem; - Relation between practice and academia;	Knowledge in digital fabrication applied to design process;	Expertise in different areas of knowledge related to architectural design;	Ability to create specific solutions with scripting;
Proposed categories	Design problem	Constructibility	Collaborative design	Design media
Combination of different ideas from literature	- Research related to design problem; (LAWSON, 2011) - Relation between knowledge from academia and practice; (KLINGER, 2008)	Knowledge in construction processes, conventional or by digital fabrication; (KLINGER, 2008); (OXMAN & OXMAN, 2010); (CELANI & SEDREZ, 2017);	Expertise in different knowledge fields related to architectural design; (KLINGER, 2008); (BERNSTEIN, 2008); (KOLAREVIC, 2008);	- Ability to create design solutions with analog and digital design media. (KLINGER, 2008); (LEBAHAR, 1999). - Knowledge in mathematics, computer science and design; (WOODBURY, 2010);

The multicultural combination reflected in a mixture of discipline and shared leadership. Japanese, english, and polish students demonstrated more discipline in co-operation tasks, as moroccan and french students demonstrated more leadership initiative during the moments of negotiation and evaluation (Kvan 2000). This combination of different profiles reflected positively, bringing dynamic solutions during the design process.

A high variety of design media from analog (such as hand sketching and physical models) to digital (parametric or non-parametric) showed the importance of multi-media and multi-domain competences (Lebahar 1999), as a facilitating mechanism of the design process.

By observing the design process of both groups and relating the results to the four analytic categories, it was possible to conclude that the students combined the following skills:

1. Good systematization of ideas to solve the design problem;
2. Focus and discipline to dedicate time to design;
3. Balance of vertical and shared leadership, to bring direction and focus to the team;
4. High skills in analog design media, such as sketching and physical modeling;
5. Ability with mathematics, logic and computational design media;

The students were invited to answer a questionnaire after the experiment to evaluate feed-back and compare students’ impressions with our conclusions. The electronic form is structured in four parts, coinciding

with the proposed analytical categories. The compilation of answers confirms the professors’ impression for each category. According to students:

- The design constraints that had more impact on the process was shape and construction;
- Parametric modeling tool was used to integrate construction constraints when replacing simple geometry with the structural element;
- Pallet constraints led to the creation of ideas of shape adaptability, impacting on design;
- Collaboration allowed a far more cohesive design but also lead to a lack of direction without strong leadership in certain moments;
- Use of hybridity made problems more apparent, helping on decision-making;

CONCLUSIONS

The contribution and originality of this paper rely on understanding how architecture students introduce construction constraints through design actions during a parametric design workflow, bringing to discussion how constructibility can impact the parametric design process in academia. Initiatives like this one, even not multidisciplinary, can help CAAD field researchers to understand how a realistic parametric design can start: by giving real constraints and asking designers to work collaboratively.

We recognize the importance of multidisciplinary approach in collaborative design like the one developed at the Georgia Institute of Technology among other institutions (Nicknam, Bernal, and Hay-

maker 2013) over the multicultural, but the relevance of this work relies on analyzing the second approach and the impact of the construction constraints on the parametric design process.

When relating the given design constraints with three-dimensional design problem model (Lawson 2005), it is possible to state that during the design processes the first constraint to appear was the formal one. The practical constraints, mainly the construction constraints, started to appear when the students tried to migrate their design to digital media. Constant use of hybrid design media helped to understand those mentioned constraints. Therefore, the main students' difficulty was the construction expertise itself, and this can be explained by the lack of experience with practice.

The use of multi-media and multi-domain competences (Lebahar 1999) was determinant to lead and facilitate the design process due to the combination of different skills of each student. Some design actions can be highlighted as decisive: 1) hand sketching to define concept and mass studies; 2) planning the code logic; and 3) use mathematics and computation to understand design. These design actions are some of the strategies observed in years of courses and workshops in parametric design (Woodbury 2010).

The paradigm of combining digital and material, in the parametric design field, must be broken since academia. A future version of the study intends to integrate multidisciplinary students. Professors from architecture and engineering schools have an important role: to initiate collaboration with each other by proposing new integrated and multidisciplinary courses. By doing this, architects and engineers of tomorrow will start to think about the constructibility of parametric design as mandatory collaborative work since early stages.

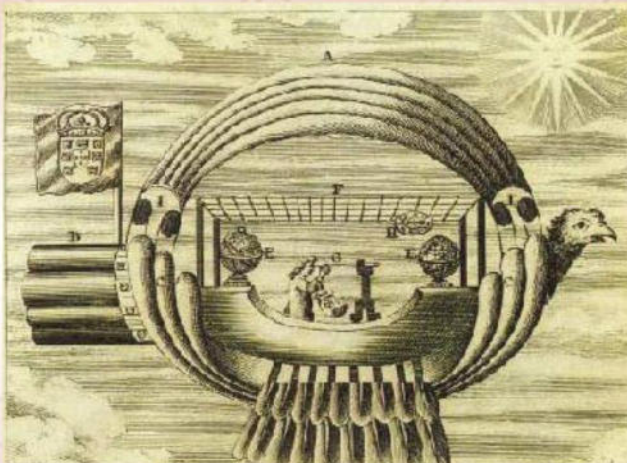
REFERENCES

- Celani, Gabriela and Sedrez, Maycon (eds) 2018, *Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão*, ProBooks, São Paulo
- Cordeiro, Aristoteles and Rocha, Germana 2017, 'Conceber arquitetura com modelos virtuais: a relevância dos sistemas estruturais', in Cordeiro, Aristoteles and Rocha, Germana (eds) 2017, *Modelos em Arquitetura: Conceção e Documentação*, UFPB, João Pessoa, pp. 19-38
- Ensley, Michael D., Hmieleski, Keith M. and Pearce, Craig L. 2006, 'The importance of vertical and shared leadership within new venture top management teams: Implications for the performance of startups', *Leadership Quarterly*, 17, pp. 217-231
- Gallas, Mohamed-Anis, Jacquot, Kevin, Jancart, Sylvie and Delvaux, Frederic 2015 'Parametric Modeling: An Advanced Design Process for Architectural Education', *Proceedings of the 33rd eCAADe Conference*, pp. 149-157
- Iwamoto, Lisa 2009, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques.*, Princeton Architectural Press, New York
- Klinger, Kevin 2008, 'Relations: information exchange in designing and making architecture', in Kolarevic, Branko and Klinger, Kevin (eds) 2008, *Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture*, Routledge, New York, pp. 25-36
- Kolarevic, Branko 2008, 'Manufacturing/material/effects', in Kolarevic, Branko and Klinger, Kevin (eds) 2008, *Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture*, Routledge, New York, pp. 5-24
- Kvan, Thomas 2000, 'Collaborative Design: What Is It?', *Automation in construction*, 9, pp. 409-15
- Lawson, Bryan 2005, *How Designers Think: The Design Process Desmystified*, Taylor & Francis Ltd, Oxford
- Lebahar, Jean-Charles 1999, *Analyse cognitive de la conception et de sa pédagogie. In: Approche didactique de l'enseignement du projet en architecture*, École d'Architecture de Marseille-Luminy
- Nicknam, Mahsa, Bernal, Marcelo and Haymaker, John 2013 'A Case Study in Teaching Construction of Building Design Spaces', *Proceedings of the 30th eCAADe Conference*, pp. 595-604
- Oxman, Rivka and Oxman, Robert 2010, 'The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies', *Architectural Design*, 80(4), pp. 14-23
- Picon, Antoine 2004, 'Architecture and the virtual: towards a new materiality', *Praxis: Journal of Writing+ Building*, 6, pp. 114-121
- Schnabel, Marc Aurel 2004 'Architectural Parametric Designing', *Proceedings of the 24th eCAADe Conference*
- Woodbury, Robert 2010, *Elements of Parametric Design*, Routledge, New York

Anexo V – Capítulo publicado no livro PHI – *Tradition and Innovation*

Tradition and Innovation

ϕ
phi
Proportion Harmony Identity



Chief-Editors:
Maria do Rosário Monteiro
Mário S. Ming Kong

Co-Editor:
Maria João Pereira Neto

CRC **CRC Press**
Taylor & Francis Group

Constructability in parametric design process: the impact of collaboration between architects and civil engineers

Verner MONTEIRO,¹ Maísa VELOSO,² Pedro JANUÁRIO³

[1] Department of Architecture, Architecture School, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brazil

E-mail: monteiroverner@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8796-2867

[2] E-mail: maisaveloso@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3224-2245

[3] CIAUD Research Center of the Lisbon School of Architecture, at Universidade de Lisboa.

E-mail: arq.pedro.januario2@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8363-461

Abstract

This paper focus on the relation between tradition and innovation present in collaborative parametric design processes focused on the building constructability. It aims to contribute to the discussion on how the incorporation of parametric modeling, as an innovative design tool, relates to the building constructability, combining it with knowledge of traditional design tools and experience in construction methods. The study presents the results of a design experiment with six collaborative teams of architects and civil engineers, describing and analyzing how the design actions were incorporated into the design process that leads to the constructability of the final design, using necessarily a parametric design tool. We observed that during the design processes a higher and more varied number of design actions led to projects with more refinement that interfered with both design process and final design. The results address that collaborative actions of teams with a multidisciplinary team include designers with skills in solving project problems; experience on the construction site; leadership; proficiency with analog and digital design media, which shall guide the parametric design process more efficiently and optimizes its quality.

Keywords: Parametric Design. Constructability. Design Process. Collaborative Design

1. Introduction

Parametric modeling, as an innovative design tool that enables the creation of design solutions through the manipulation of computational parameters, gave architects the possibility of experiencing the freedom to create unprecedented geometric shapes (Kolarevic, 2008). However, along with it, new materialization challenges arose. Dealing with the innovative parametric environment and traditional construction constraints requires systematization of the design process, especially when working collaboratively. Among the first to introduce the concern with materialization in the digital age was Picon (2004). He stated that the development of digital design is often presented as challenging to particular aspects and constructive technologies. Computer-based design frequently seems to neglect the material dimension of architecture and its relationship to properties such as weight, elasticity, and strength. The reason, according to Picon (2004), is that on the computer screen, shapes seem to float freely, without constraints beyond those existing in the computational tool and the designer's imagination. In the digital design context, Iwamoto (2010) indicates that the introduction of digital

technologies, especially digital manufacturing, drives changes that begin to interfere in the construction site of contemporary architecture. Notable examples of this new way of designing and materializing architectural shapes are the Frank Gehry's Guggenheim Museum in Bilbao and the Walt Disney Concert Hall.

This and other cases show that the architectural shape needs to arise concurrently with a structural design concept, to avoid unfeasibility, especially when the shape defines the architecture itself (Cordeiro, Rocha, 2017). Designing non-standard architecture, whether with or without a computer aid, requires going beyond the creation of complex geometries in the conceptual phases: the constructability of the building must be introduced into the design process. It happens when, according to Mendelsohn (1997), there is an integration between three main fields of knowledge: construction, planning, and design.

With parametric modeling, early design models become conceptually stronger than traditional CAD models and less constrained than building information models (Woodbury, 2010).

The demand for the materialization of contemporary architecture has led specialized companies to offer consultancy in design and

manufacturing processes, to bring constructability to complex-shaped buildings. These companies usually begin to work at different stages (Celani, 2017; Klinger, 2008; Mehrtens, 2017). While some start to work since early design stages, others are involved in converting scaled prototypes into 1:1 scaled buildings.

This latter scenario goes against the New Structuralism manifest (Oxman & Oxman, 2010). It defines that structure, encoding, and fabrication of material systems have become a common area of study for both architects and civil engineers. The authors point out that contemporary and innovative design processes, like the parametric one, must return to their traditional and material sources, which leads to thinking of constructability collaboratively, since the initial stages of design.

In this context, we ask how constructability impacts parametric design processes. Our hypothesis is that, in the parametric design process, traditional construction constraints became radical constraints (Lawson, 2005), those that guide or constitute the essential basis of design processes. This leads more easily both architectural/structural design and construction process.

To test the hypothesis, a design experiment was held with professionals, that combined with other methodological stages, structured the methodology of an ongoing Ph.D. thesis. This experiment was called Parametric Design Workshop and involved architects and civil engineers who graduated in a range from 5 to 34 years ago. The aim was to analyze how construction constraints (a traditional knowledge for most designers) affected design processes that use parametric modeling as design media (innovative for most designers).

The results were analyzed from four categories, generated by the concatenation of ideas of several authors in the field of design studies and parametric design.

2. Methodology

The research methodology was based on the observation of design processes during a Parametric Design Workshop. It was an integrated initiative, held by three professors, that was motivated by: 1) the demand of teaching computational design to master students of architecture; 2) an ongoing Ph.D. research in the field of parametric design; and 3) the demand to build a covered sidewalk to connect two buildings of a University, with the participation of civil engineers.

The workshop was divided into three phases: training, design, and materialization. The first one was used to give basic skills on CAD software, named *Rhinoceros*, its parametric plug-in *Grasshopper*, and in the structural analysis add-on

Karamba3D. During subsequent stages, the participants were grouped to design based on given constraints. Participated in the workshop 22 designers: 15 master student architects, four graduated architects, and three graduated civil engineers. Most of the participants were independent designers, with their own office, or designers in a public institution.

The detailed methodology of the experiment was described by (Monteiro, Veloso, & Andrade, 2019). The aim was not only to train designers to apply parametric tools, but mainly to provoke the integration of these tools with the building constructibility.

After the training stage, participants were classified and distributed from groups 1 to 6. The criteria for grouping considered: i) graduated in architecture or civil engineering; ii) the professional bond; iii) time of graduation and iv) skills with parametric modeling (observed by the authors during the training phase).

Groups 1 to 3 had only architects (three in groups 1 and 2, and four in group 3) categorized as collaborative 1 (C1), while groups 4 to 6 had three architects and a civil engineer, classified as collaborative 2 (C2).

At the launching of the design exercise, the participants were warned that the results would be submitted to a competition so that the University could construct the project selected as the winner.

3. Parametric design processes

The six groups started to develop their design by defining the dynamics of the relationship between designers. It was imposed that all groups would have to accomplish, as mandatory actions:

- Time management
- Determine which type of collaborative design would be adopted (internal competition or co-design)
- Studies of design references
- Define the design concept
- Parametric modeling overall strategy

After the five mandatory actions, the next ones would be optional. The teams would have to be able to fit new design actions according to each specific design process. The designers adopted the methodological strategies that they judged most appropriate to their design processes. In the description of the activities of each group, in addition to mapping the actions taken by each one, the main actions will be highlighted, chosen by the authors as the most determinant during the design process.

3.1. Group 1: Twisted Triangular Prism

This group designed a semi-permeable hallway, generated from a triangular frame that was successively rotated along the longitudinal axis of the project. The four free design actions adopted by

this group included:

- A mass study using hand sketches
- Generation of design alternatives in the parametric model
- Quantification of structural elements using a Building Information Model
- Generation of renderings

The design concept focused on the creation of a closed hallway, generated by a basic polygon, with openings to generate access to the surrounding buildings and sidewalks that connect them. It was possible to identify the presence of formal and practical constraints, the last one with constructive characteristics.

The first basic geometric module - a pentagon -, would generate many waste and adjustments, so the group decided to transform it into an equilateral triangle, justifying aspects of cost and construction. These developments transmitted the idea of the project in sketch and the parametric modeling. In the parametric modeling tool, this action took seconds, considering that they determined as a parameter the control of the number of sides to recondition the entire shape of the project.

The developed code was divided into parameter controls (especially those linked to structural elements), creation of the main geometry, and algorithms in charge of removing structural parts to generate accesses.

The group was one of those that devoted less time to the activity, and this reflected in a smaller number of design actions. However, they achieved a compact design, thanks to the experience of two team members in both traditional construction methods and innovative computational design tools.

3.2. Group 2: Rotated Pentagonal Prism

To develop a proposal of a closed hallway, which was structured by a rotated pentagonal prism, group 2 adopted five free actions also the mandatory ones:

- A mass study using hand sketches
- A mass study using a geometric modeling
- Generation of design alternatives in the parametric model
- Generation of renderings
- Prototyping of modules of the final design

Group 2 considered a design concept like the one developed by group 1. They also concerned about the contact between the structure and the soil (Figure 1). Then, they developed a parametric model, switched to a geometric model, and returned to the parametric model, due to the amount of rework they would have faced when simulating future design alternatives in traditional tools.

The parametric modeling helped to simulate the spacing alternatives between frames and their rotations. This led to material optimization, allowing the analysis of the overall shape and its constructability in an integrated way, using sub-multiple measures of the original element, avoiding wastes. Only two basic modules were generated, the first ones with two types of placement. This brought a great geometric rationalization to the project without losing the desired effect.

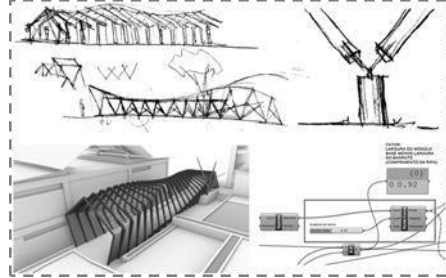


Fig. 1: Main design actions and representations of group 2.

We observed that the code had a poor systematization, perhaps because it simulated only part of the project. Hence, there were a few possibilities of parametric alternatives for the project in real-time.

3.3. Group 3: Connected Open Fans

The group 3 designed a semi-permeable based on a composition of fan-shaped pillars, with closing sleepers at the top. The team adopted six actions beyond the five mandatory ones, bringing a design process that used a combination of different strategies and a variety of design media, such as:

- A mass study using hand sketches
- A mass study using a geometric modeling
- Generation of design alternatives in the parametric model
- A mass study using origami models
- Generation of constructive details
- Prototyping of modules of the final design

The design concept brings the use of fan-shaped pillars, with thin pieces of wood, due to their low cost, which would collide to form an intertwining. However, the overall shape result was not consensual. They started a mass study with hand sketches, which were synthesized in a geometric model, and was applied simultaneously to parametric modeling. The design shifted to the use of pillars arranged as an accordion, but then designers returned to the idea of triangular pillars with uniform size, derived from origami folds.

Due to the difficulty of generating the desired shape only by parametric modeling, designers started to link the code to non-parametric curves. This avoided the use of complex mathematical rules.

The group focused too much on creating formal solutions, unsatisfactorily solving constructive inconsistencies. The variability of angles derived from the structural joints lead designers to elaborate a typical structural node to embrace every connection. However, after analyzing the parametric model, we conclude that the solution did not accommodate all the angles (Figure 2).

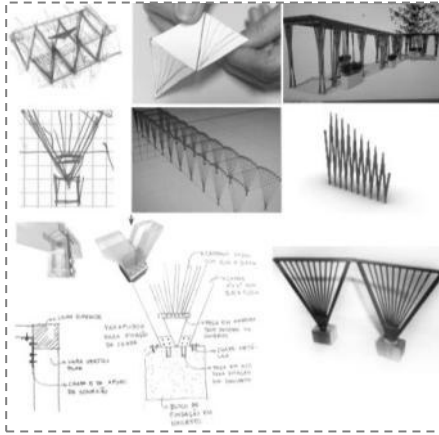


Fig. 2: Main design actions and representations of group 3.

Despite the formal complexity of the final design, there was no sufficient resolution of the constructability of the main geometry and its joints. This probably happened because the team did not take construction constraints into account since the early stages of design.

3.4. Group 4: Foldable Triangular Modules

This group took advantage of eight free design actions, after going through the five mandatory ones, as listed below:

- A mass study using hand sketches
- Creation of a typical detail metallic connection
- A mass study using a geometric modeling
- Generation of design alternatives in the parametric model
- Creation of a structural model
- Structural analysis using *Karamba3D*
- Dimensioning structural cross-sections
- Prototyping the entire model and the metallic connection

The design process (Figure 3) started with an initial concept (triangulation) elaborated since the statement of the design exercise. It was the use of triangles distributed in space, inspired in the existing structures at the surroundings. As the design concept emerged, construction constraints started to be considered. The main one was the creation of a solution to attach new structural

elements to the existing columns and beams. The team started to feel the need to use more accurate design tools, such as CAD 2D and 3D, to predict the conflicts of the proposed geometry.

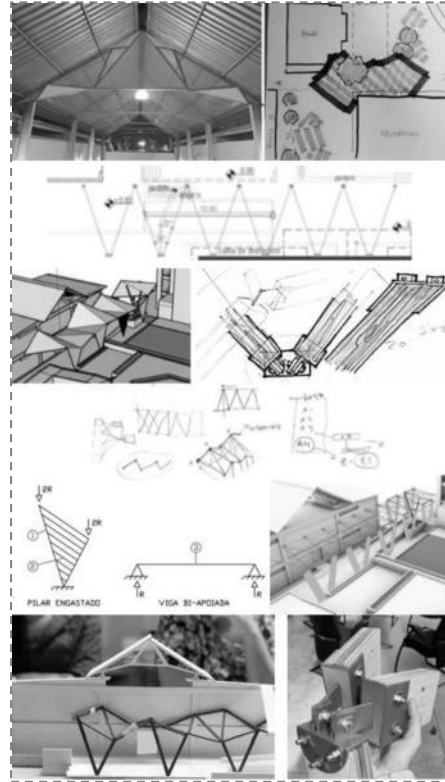


Fig. 3: Main design actions and representations of group 4.

After defining the positions of the columns, a first geometric model was generated to check the relationship between the project and the pre-existences. The next step was to start coding, by defining parametric rules, while the structural model and were conceived. The results showed that optimization increased when connections between columns and the soil could avoid rotation and translation on X, Y, and Z-axis. Besides that, the connection between columns and beams should allow rotation in the X-axis. The column-beam rotation allowed moments not to be transmitted from the column to the beams.

In addition to the use of *Karamba3D* to structural analysis, manual calculations were also used, indicating that not only the architects had to have multimedia and multidomain skills, as advocated by Lebahar (1999), showing a combination of traditional and innovative knowledge.

As the project that won the competition, it went through the materialization phase. Two prototypes were developed: a big and overall model and the

other one showing the connection detail. In this phase, geometric problems were identified in the metallic connector, which was later remodeled. The team developed the design representations by choosing one of the possible design alternatives. Group 4 presented a wide variety of design actions, showing how the integration between tradition and innovation can address to a satisfactory result.

3.5. Group 5: Indigenous Hut

This group designed a semi-permeable and linear hallway, surrounded by pillars connected by thin diagonal strips, generating a grid membrane that is similar to indigenous huts. The design process included eight free design actions:

- A mass study using hand sketches
- Study of constructive details
- Generation of design alternatives in the parametric model
- A mass study using a scaled wood model
- Structural calculations
- Creation of a structural model
- Generation of renderings
- Mock-up fabrication (Making a column in 1:1 scale, with the same materials used in the real building construction)

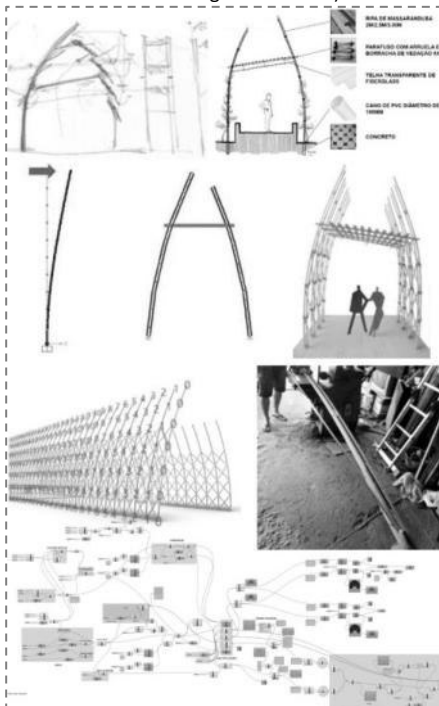


Fig. 4: Main design actions and representations of group 5.

The design concept (Figure 4) refers to the use of the bow and arrow and was present since the first design meeting. The arches would be the set of

pillars, the arrow the beams that pull the pillars. Both would be made with wooden slats; the latter being set in the soil on foundations made of 100 mm PVC pipes.

Then, the main design geometry and the construction details were developed using sketches, and from this, the civil engineer calculated the structural behavior manually and set up a structural analysis model, validating the initial design.

What followed next was the development of the code in the parametric tool *Grasshopper*, to search for design alternatives. The final step of the group was to produce a 1:1 constructive mock-up of the column, to test the torsion of the structural element.

The group demonstrated a valuable skill in the parametric modeling when using the code's data tree to plot the slats. This demanded more dedication to the parametric modeling than the average of the other groups. Hence, the proposal showed a high integration of parametric modeling with the constructive issues inherent to the final design.

3.6. Group 6: Connected Origami Modules

The group 6 designed a geometry generated from a sequence of projected trapezoids that alternate heights, with a permeable passage on the sides. The designers added five design actions to the five mandatory ones:

- Mass study using a geometric modeling
- Generation of design alternatives in the parametric model
- Creation of a structural model
- Structural analysis using *Karamba3D*
- Generation of renderings



Fig. 5: Main design actions and representations of group 6.

Strongly influenced by the design reference (origami composition by the artist Peter Dahmen), the group adapted the reference to the geometric reality of the pre-existent. Without using any hand sketches, unlike the other groups, they developed a mass study using a geometric modeling, bringing modules of four pillars and four beams, resulting in

a trapezoidal projection (Figure 5). From this, they made the structural model, the parametric modeling - where they tested a variation of module heights and profile widths – thus the final verification of the parametric structural model.

The code development of group 6 required much effort, as they chose to create many components, despite having only a few parameters to control. For each point generated in *Rhinoceros*, there was a correspondence in *Grasshopper*, making the parametric model very heavy and difficult to operate. The group was one of those that least interacted, also having only nine design actions in total, the same as group 2.

4. Discussion

Klinger (2008) lists critical topics when designing contemporary architecture: related research, manufacturing, consulting, and software and programming. We adapted it proposing the categories “design problem,” “constructability,” “collaborative design,” and “design media”, which includes the design process point of view (Lawson, 2005; Lebahar, 1999), as well as aspects of computational design and technology (Kolarevic, 2008; Oxman & Oxman, 2010; Celani & Sedrez, 2017; Woodburry, 2010).

Teams’ final design presented extensive research related to the “design problems” stated in the exercise. This may have been achieved due to the participants’ experience with design practice and research. In most teams, the predominant constraint at the beginning of the processes was the formal one. The practical, related to construction, began to appear shortly after that, diverging from what is usual in the nonparametric design processes of the participants, as they declared.

Regarding the “constructability” category, groups 4 to 6 (category C2) revealed more exchange of expertise in early stages, bringing a more significant impact throughout the process.

While the diversity of skills of groups 4 and 5 demonstrated effectiveness, as defended by Oxman & Oxman (2010), there was a limiting effect in group 6. The designers in this group took the constructive constraint so radically that it hindered the search for design alternatives and creativity.

Considering the “collaborative design” category, the C2 group’s category stood out. The presence of experienced architects and civil engineers brought greater constructive technical rigor, considering aspects such as assembly, logistics, and structural design. This was more latent in groups 4 and 5, the only ones that had architects who graduated more than 20 years ago, and due to diversity of design skills. The diversity inherent to the designers’ profile is essential, as advocated by Oxman & Oxman (2010), to guide contemporary

architecture. However, the results addressed that the experienced architects are very important to the team, demystifying that the civil engineer is the only validator of constructive solutions.

When considering the “design media,” the higher the combination of design tools (traditional and innovative), such as hand sketches, geometric and parametric modeling, and structural analysis, the more requirements were achieved, and the higher quality was the final design. It was observed, at different levels, the development of skills in multimedia and multidomain areas, as mention Lebahar (1999). The presence of at least one professional with skills in computational design tools in each team was essential, but it was not enough. This, combined with the time of graduation and experience, increased team performance.

From the analysis of the design actions, it was possible to conclude that the groups were composed of professionals who combined skills such as 1) Good systematization of ideas to understand the design problem; 2) Knowledge of traditional construction methods; 3) Leadership; 4) High skill in analog design media; 5) Logical and mathematical thinking; 6) High skill in digital design media;

5. Conclusions

Analyzing from Lawson’s (2005) design constraints point of view, the design processes of the groups indicated that the formal constraint was the first to appear. Then, practical constraints started to show up, but at different times in the teams.

In groups composed of experienced civil engineers and architects, practical constraints, especially the constructive ones, and budget constraints, appeared in parallel to the formal one and gained strength throughout the process. This meant that rework was reduced, and teams were able to guide the design process with fewer impasses. The deviation from this pattern occurred only in group 6, which despite proposing a feasible project, did not dare (in terms of shape complexity) like the other teams, making the design process conduction easier. Additionally, only group 3 did not present a project with a feasible construction, indicating that the launched hypothesis was not confirmed only for this group.

The use of several design actions, especially by groups 4 and 5, demonstrated that a high exploration of multimedia and multidomain skills, as defended by Lebahar (1999), contributes positively to design processes and final design, and this diversity was very present in the parametric design processes observed in this study. More specifically, the following design actions appeared to be decisive: 1) hand drawing; 2) copy and modify previously existing models and codes; 3) relate

mathematical and computational rules to understand the project better, and 4) create the structural model with analog and parametric design media. Woodbury (2010) pointed out the first three listed strategies as the basis for designers who want to build their scopes for parametric projects.

Regarding the framing of the groups' design actions in the proposed categories, the study addresses that the diversity of categories was correctly reached thanks to the variety of the designers' profile, which included skills in solving a design problem, construction site experience, leadership and multimedia, and digital design skills. This fact led to a more fluid parametric design process and consequently brought more quality to the final design.

The diversity of collaborative C2 teams seemed to have an impact on the development of design processes, with the integration between construction, planning, and design being present, as stated by Mendelsohn (1997), in his concept of constructability. It was possible to realize how difficult it is to find a single professional profile that concentrates all the knowledge necessary to reach the proposed categories of analysis, revealing the importance of multidisciplinary and collaborative work. The arrangement of groups 4 and 5 demonstrated the importance of different skills and diversification of the design actions contained in the design process so that consequently, the final design has greater constructive feasibility.

A high diversity of traditional and innovative knowledge presented by group 4 and 5 gave more fluidity to the design processes. This showed the potential of integration between tradition and innovation in collaborative teams of architects and engineers, who working together since early design stages, were able to achieve feasible parametric design solutions.

The initiative to group designers in collaborative teams to analyze parametric design processes focusing on constructability brought enlightening results that may be considered in future studies in the field of parametric design. This indicates a potential for further implications, like including industry partners in the design teams and/or simulating the same investigation in educational context.

Bibliographical References

- Celani, G. (2017). Uma nova era para a arquitetura. In G. Celani & M. Sedrez (Eds.), *Arquitetura Contemporânea e Automação: prática e reflexão 2* (pp. 17–20). São Paulo: ProBooks.
- Cordeiro, A. L. de M., & Rocha, G. C. (2017). Conceber arquitetura com modelos virtuais: a relevância dos sistemas estruturais. In A. L. de M. Cordeiro & G. da C. Rocha (Eds.), *Modelos em Arquitetura: Concepção e Documentação* (p. 314). João Pessoa: Editora da UFPB.

- Iwamoto, L. (2009). *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. New York: Princeton Architectural Press.
- Klinger, K. R. (2008). Relations: information exchange in designing and making architecture. In Branko Kolarevic & K. R. Klinger (Eds.), *Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture* (pp. 25–36). New York: Routledge.
- Kolarevic, B. (2008). The (risky) craft of digital making. In *Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture*. New York: Routledge.
- Lawson, Bryan (2005). *How Designers Think: The Design Process Demystified*, Taylor & Francis Ltd, Oxford
- Lebahar, J. C. (1999). Analyse cognitive de la conception et de sa pédagogie. In *Approche didactique de l'enseignement du projet en architecture*. Marseilha: École d'Architecture de Marseille-Luminy.
- Mehrtens, P. (2017). Do projeto à fabricação. In G. Celani & M. Sedrez (Eds.), *Arquitetura Contemporânea e Automação: prática e reflexão 2* (pp. 182–188). Sao Paulo: ProBooks.
- Mendelsohn, R. (1997). The Constructability Review Process: A Constructor's Perspective. *Journal of Management Engineering*, 13 (3), 17–19.
- Monteiro, V., Veloso, M., & Andrade, H. (2019). Oficina de Projeto Paramétrico Colaborativo com ênfase na construtibilidade: uma experiência de pesquisa, ensino e extensão. *Revista Projetar*, 4(11), 77–93.
- Oxman, R., & Oxman, R. (2010). Introduction-The new structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. *Architectural Design*, 80 (206), 14–23. <https://doi.org/10.2307/2075548>
- Picon, A. (2004). Architecture and the virtual: towards a new materiality. *Praxis: Journal of Writing+ Building*, (6), 114–121.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design*. New York: Routledge.

Anexo VI – Artigo publicado no periódico on-line Arquitextos

Construtibilidade e parametrização em projetos colaborativos**Desafios para o ensino e a prática profissional em Arquitetura**

Verner Monteiro, Maísa Veloso e Pedro Januário

Walt Disney Concert Hall, Los Angeles, 2003. Arquiteto Frank O. Gehry
Foto Verner Monteiro

Um modelo paramétrico consiste na representação computacional de um objeto construído com entidades, cujos atributos podem ser fixos ou variáveis. Os atributos variáveis podem ser representados por parâmetros e regras, de forma a permitir que objetos sejam automaticamente ajustados de acordo com o controle do usuário e a mudança de contexto (1). Ao possibilitar a parametrização de formas arquitetônicas pela manipulação de algoritmos computacionais, esse recurso proporcionou aos arquitetos liberdades de concepção formal sem precedentes (2).

A combinação de diversos parâmetros possibilita a criação de formas de maior complexidade, fazendo com que a parametrização traga consigo novos desafios de construtibilidade do projeto. A integração dessas duas variáveis de projeto trouxe novos paradigmas ao processo de concepção arquitetônica. A combinação da dificuldade de lidar com o meio paramétrico e a construtibilidade desses projetos passou a exigir uma sistematização particular do processo de projeto, demandando integração de conhecimento por equipes trabalhando em contextos colaborativos.

Projetos baseados em computador comumente parecem negligenciar a dimensão material da arquitetura e a sua relação com propriedades como peso, elasticidade e resistência. Na tela do computador, formas parecem flutuar livremente, sem restrições além daquelas existentes na ferramenta computacional e na imaginação do projetista (3). Nesse sentido, a introdução de tecnologias digitais ao projeto impulsiona mudanças que começam a interferir no canteiro de obras da arquitetura contemporânea (4). Exemplos pioneiros dessa arquitetura, o Museu Guggenheim de Bilbao e o Walt Disney Concert Hall, demonstram que a forma arquitetônica necessita nascer concomitantemente a uma proposta de estrutura para que não haja risco de inexistência, especialmente quando a forma define a própria arquitetura (5).

Ferramentas como a modelagem paramétrica "proporcionam novos caminhos projetuais a arquitetos por meio da quebra de relações previsíveis entre forma e representação, em favor das complexidades geradas

249.00 projeto
paramétrico
sinopses
como citar

idiomas

original: português

compartilhe



249

249.01 arquitetura e
psicanálise
A cidade diz tudo o que
você deve pensarNotas para uma
discussão teórica sobre
a noção de
significação249.02 mobilidade
Vida, espaço, edifício
São Paulo para pessoas

Matheus Oliveira Costa

249.03 sociologia
urbanaCaminhadas
observacionais de
CuritibaUma experiência urbana
de 152 km
Mário Sérgio Freitas e
Rafael Codognato

249.04 artes visuais

Deslocamentos de
arquiteturas
imagináriasA 7ª Bolsa Pampulha
Letícia Becker
Savastano249.05 Covid-19 em São
PauloUma paisagem social da
pandemia do Covid-19 no
município de São Paulo
Euler Sandeville Jr. e
Bruna Feliciano Palma249.06 historiografia
de BrasíliaVertentes da
historiografia e da
crítica de Brasília
Maria Fernanda Derntl249.07 conforto
ambientalAvaliação bioclimática
do Edifício da Sudene,

computacionalmente” (6). Nesse sentido, o meio paramétrico é complexo, “talvez mais do que qualquer já utilizado na história do projeto” (7).

Apesar de exigir muito esforço de aprendizagem, após domínio, “o algoritmo é mais fácil de manusear do que um conjunto de desenhos” (8). A mudança para a plataforma, no entanto, implica em um custo: leva energia na forma de consumo de ações cerebrais para se acompanhar um algoritmo inteligente. Esse desenvolvimento é transformativo na medida em que ocorre um envolvimento do projetista com a era da informação, cuja tecnologia leva a maiores possibilidades de criação, onde as ideias passam a romper as barreiras tecnológicas, levando ao surgimento de inovação e exploração (9). Entretanto, “esses métodos formam parte de um kit de ferramentas mais abrangente para o projeto de arquitetura, que também inclui modos tradicionais de criação e representação como os esboços, desenhos, modelagem física e pintura”.

Projetar formas que fogem à tradicionalidade, seja com ou sem auxílio de computador, exige ir além da criação de geometrias complexas nas fases conceituais: a construtibilidade do edifício deve ser também introduzida no processo de projeto. Ela acontece quando há a integração entre três campos de conhecimento: construção, planejamento e projeto (10).

A difícil tarefa de materialização da arquitetura contemporânea fez surgir no mercado empresas especializadas na integração entre projetos de geometrias complexas e processos construtivos. Alguns autores (11) indicam que a inserção dessas empresas ocorre em fases distintas do processo de projeto. Enquanto algumas delas se inserem desde as fases iniciais, outras entram na conversão de protótipos de projeto de escala reduzida em edifícios de escala 1:1.

Esse fenômeno de mercado vai contra o que defende o manifesto do Novo Estruturalismo (12). Ele define que estrutura, programação computacional e fabricação de sistemas materiais se tornaram área de estudo comum a arquitetos e engenheiros calculistas. O manifesto reforça que os processos de projeto devem retornar às suas fontes materiais, o que remete a pensar, colaborativamente, a construtibilidade desde as fases iniciais de concepção do projeto.

“A construtibilidade dialoga com sistemas de gerenciamento de projeto que usam conhecimento construtivo otimizado e experiência para potencializar o resultado da obra” (13). Para os autores, à medida que o processo projetual está vias de considerar aspectos de construtibilidade, as relações entre os elementos físicos e digitais ganham novas formas. A integração preocupa-se menos com o estudo da forma das representações digitais, e mais com questões de construtibilidade. Nesse sentido, o uso de protótipos físicos em escala 1:1, os chamados *mock-ups*, com os sistemas do edifício produzidos por fabricação digital, promovem informações valiosas para o desenvolvimento do projeto (14).

É a partir da articulação apropriada entre o conhecimento em construtibilidade e habilidades com o meio digital que a agenda para o futuro dos cursos de arquitetura deve ser estruturada (15). E essa diretriz pode ser também conduzida para o meio profissional, para aqueles que decidam pela adoção da tecnologia, ainda que tardiamente.

A partir deste contexto, pergunta-se: Como a integração entre construtibilidade e parametrização interfere no processo de projeto colaborativo de arquitetura, tanto em nível de formação como de atuação profissional? Lançamos a hipótese de que a construtibilidade do edifício, enquadrada como restrição prática (16), assume caráter de restrição radical (aquela que guia ou constitui a base essencial de determinados processos de projeto), e deve ser integrada à geração paramétrica da forma (restrição formal) durante todas as fases do processo de projeto. Ou seja, a parametrização deve dialogar constantemente com soluções construtivas potencialmente conhecidas pelos projetistas.

Para testar essa hipótese, foram realizados experimentos de projeto com grupos de estudantes e profissionais, com o objetivo de analisar, através do mapeamento das ações projetuais adotadas, como a construtibilidade e a parametrização integraram-se no processo de projeto. Mais especificamente, buscou-se averiguar principalmente duas situações distintas: 1) quando o estudo da forma paramétrica é priorizada em detrimento das soluções técnicas construtivas, sendo a restrição formal a guia do processo de projeto; e 2) quando as soluções técnicas construtivas são consideradas para subsidiar a criação das alternativas paramétricas, tornando-se a restrição radical do projeto.

Metodologia

A metodologia do estudo consistiu na realização de experimentos de projeto em dois níveis distintos: na formação acadêmica de graduação com equipes de estudantes e na formação pós-graduada profissional com equipes de arquitetos e engenheiros. Os experimentos com acadêmicos ocorreram com uma turma de estudantes de arquitetura de diversas nacionalidades, na Universidade de Lisboa. Os experimentos com profissionais, por sua vez, ocorreu na Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, envolvendo arquitetos e engenheiros civis brasileiros com experiência profissional variando entre cinco e trinta e quatro anos.

O estudo realizado na Universidade de Lisboa - UL, Portugal (17), foi conduzido durante o ano acadêmico de 2019-2020, durante a disciplina Modelação Geométrica e Generativa, que faz parte do programa de mestrado integrado da Faculdade de Arquitetura da UL. Oito estudantes, de cinco

Recife PE

Ruskin Freitas, Jaucele Azerêdo e Carlos Falcão

249.08 arquitetura escolar

Escolas modernas em São Paulo: passado e presente

O FDE sob a ótica das experiências de Rino Levi, Vilanova Artigas e João Walter Toscano
Nicolás Sica Palermo

249.09 conselho de fiscalização

profissional

Atribuições

compartilhadas na área da arquitetura e interiores

Uma necessária aproximação entre os conselhos profissionais dos técnicos industriais e dos arquitetos e urbanistas do Brasil

Felipe Darriel Pinto e Cláudio Silveira Amaral

diferentes nacionalidades, foram divididos em dois grupos e supervisionados por três professores. É importante destacar que nenhum dos participantes tinha experiência profissional como projetistas, uma vez que o tratado de Bolonha dá a possibilidade de o mestrado ser feito de modo imediatamente subsequente à graduação.

O experimento com profissionais envolveu projetistas que participaram de uma ação integrada de ensino, pesquisa e extensão, que foi sediada na UFRN em Natal RN (18). Era requisito básico ter experimentado a prática profissional, além do interesse em se capacitar em ferramenta projetual paramétrica, especificamente com o *plug-in Grasshopper*, e os *add-ons Karamba3D* e *Kangaroo*, do software *Rhinoceros*.

Durante a realização de ambos os experimentos (com estudantes e profissionais), duas fases foram bem definidas: treinamento e concepção, que foram subdivididas em estágios específicos. A fase de treinamento envolveu a capacitação em ferramenta computacional de modelagem paramétrica, uma vez que tanto os estudantes como os profissionais não possuíam habilidades nesse meio projetual, seja atuando na academia ou no meio profissional. Foram realizados exercícios que envolveram desde a mais simples até a mais complexa manipulação da forma. Na fase de concepção, que durou quatro semanas, os envolvidos nos experimentos tinham que elaborar um projeto paramétrico em colaboração com seus pares, normalmente formando grupos de quatro pessoas. Foi na fase de concepção que foram observados e analisados os processos de projeto, uma vez que a fase de treinamento não envolveu concepção.

Os grupos de estudantes foram nomeados como colaborativo ensino 1 (CE1). Os dois grupos de estudantes envolvidos (G1-E e G2-E) conceberam propostas para um pavilhão de estadia e contemplação em uma pequena área do Jardim do Estoril, situado na região metropolitana de Lisboa. Os seis grupos de profissionais (G1-P a G6-P) desenvolveram uma passagem coberta para interligar dois edifícios do Departamento de Arquitetura da UFRN, em Natal, Brasil. Os grupos G1-P a G3-P foram compostos apenas por arquitetos, e os grupos G4-P a G6-P mesclou arquitetos e engenheiros civis. Isso fez surgir duas subcategorias: colaborativo profissional 1 (CP1) e colaborativo profissional 2 (CP2).

Para ambas as categorias, tanto estudante como profissional, um enunciado projetual determinou que as propostas deveriam obrigatoriamente observar restrições projetuais de pré-existência do local, mas sobretudo, restrições construtivas relativas à lista de materiais e quantidades fornecidas. Para o experimento com estudantes em Portugal, ficou estabelecido que o material principal seria paleta de madeira, e para o experimento com os profissionais no Brasil, peças de madeira de seções retangulares distintas.

Além destas restrições, também foi exigido que o projeto apresentasse complexidade geométrica, e que um dos meios de concepção fosse a modelagem paramétrica, para que o projeto surgisse a partir da geração de alternativas originadas pela manipulação de parâmetros. O projeto alvo do experimento no Brasil teve uma peculiaridade: a possibilidade de uma das seis propostas desenvolvidas ser executada, escolhida por um júri composto por professores e representantes da Universidade em um concurso interno de ideias.

Os processos projetuais no ensino e na prática

Foi sugerido que todos os grupos adotassem quatro ações projetuais: 1) elaboração de plano de atividades e cronograma do processo projetual; 2) definição da modalidade colaborativa; 3) estudo de referências projetuais; e 4) definição do partido arquitetônico. A partir destas ações, os grupos ficariam livres para adotar outras estratégias, de acordo com a sua interpretação do problema projetual.

Os projetos da categoria CE1 (grupos com quatro estudantes cada) tiveram processos que percorreram caminhos relativamente distintos. Enquanto o primeiro grupo pensou que o módulo básico seria o paleta dividido em quatro partes quadradas, em vista superior, o segundo grupo pensou em segmentar cada paleta em fatias (correspondentes a uma faixa do ripado de madeira). A partir dessa definição, os estudantes do G1-E definiram uma forma geométrica orgânica cujo interior seria preenchido pelos $\frac{1}{4}$ de paletes, fazendo coincidir os apoios centrais para dar sustentação estrutural por sobreposição. Essa análise de viabilidade construtiva feita pelo grupo foi um fator decisivo para a viabilidade da proposta. O G2-E, por sua vez, teve a intenção de criar uma forma que pudesse gerar alternativas de contração e expansão por meio da movimentação das fatias de paletes. O estudo da materialidade do módulo, desde a segunda semana, usando modelos físicos, foi fundamental para que os estudantes conseguissem abstrair o que pensaram em criar. Os intervalos numéricos de contração e expansão dos módulos, percebidos durante o estudo de materialidade, foram a base fundamental para que a modelagem paramétrica fosse desenvolvida.

Na categoria CP1, composta por quatro arquitetos cada, os grupos G1-P e G2-P desenvolveram propostas relativamente semelhantes, mas com processos também distintos. Ambos consideraram as restrições construtivas desde a geração da forma.

O primeiro grupo buscou focar, com grande ênfase, na análise de viabilidade construtiva e a sua incorporação ao modelo paramétrico desenvolvido. Isso envolveu diversos ciclos de análise, síntese e avaliação (19), por meio da exploração de multimeios e multidomínios

projetuais (20). A análise de alternativas paramétricas os ajudou a alterar dramaticamente a forma, a uma semana do fim do prazo de entrega dos resultados.

Os profissionais do segundo grupo pensaram na sua proposta projetual de maneira altamente integrada a questões construtivas, inclusive com o planejamento de racionalização geométrica de cada encaixe e rotação do módulo básico do projeto. Contudo, poucos usaram a modelagem paramétrica para auxiliá-los, devido ao fato de a ferramenta ter se tornado uma forte restrição aos participantes. Isso comprometeu a criação de uma gama de alternativas que poderiam possivelmente ser escolhidas.

O grupo G3-P explorou bastante a modelagem paramétrica e a criação de alternativas, desde a segunda semana de trabalho. Isso envolveu a remodelação da proposta projetual algumas vezes. Apesar da riqueza na exploração da ferramenta, a análise de viabilidade construtiva ficou para o final do processo, gerando inconsistências de adaptabilidade dos detalhes típicos projetados.

A categoria CP2, que tiveram grupos com um engenheiro civil e três arquitetos cada, desenvolveram propostas de resultados formais bastante distintos. As três equipes tiveram um ponto em comum: analisaram a viabilidade construtiva de possíveis soluções concomitantemente à criação da forma, desde os estágios iniciais, sempre com intensa participação do engenheiro civil. Foi dessa categoria que saíram os dois primeiros lugares no concurso interno de ideias lançado pela UFRN.

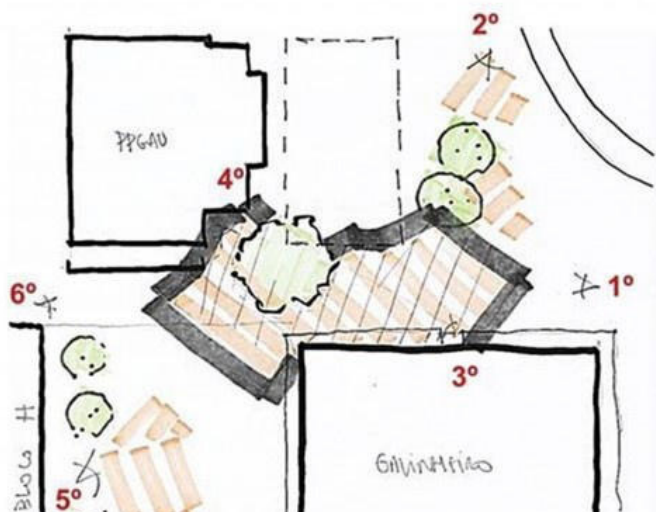
O grupo G4-P desenvolveu uma proposta baseada na pré-existência da cobertura de um dos edifícios cuja nova cobertura iria interligar, usando os triângulos das treliças como embrião conceitual. Analisaram como viabilizariam a fixação da nova estrutura àquela existente desde as primeiras semanas do processo. Depois da resolução da forma potencial e de suas consequentes implicações construtivas, planejaram e desenvolveram a modelagem paramétrica, que sempre esteve articulada à idealização de um encaixe estrutural universal. A criação de um modelo estrutural e a posterior análise estrutural serviram também de base para esses encaixes, tendo reflexão direta na geração das alternativas paramétricas. Desse modo, os requisitos técnicos acompanharam o desenvolvimento da forma arquitetônica a todo momento.



Projeto do grupo G4-P
Elaboração dos projetistas

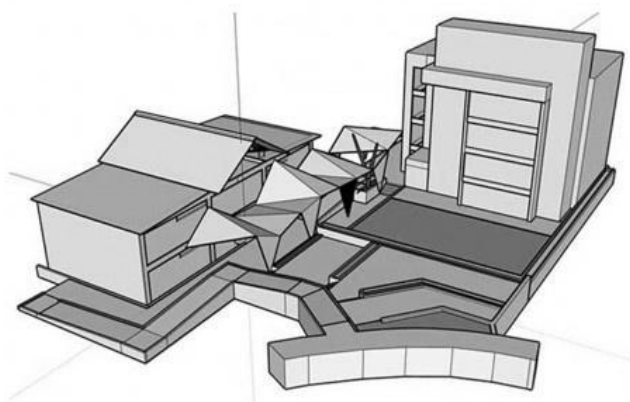
SEMANA 1

Definição do partido arquitetônico e análise de viabilidade construtiva



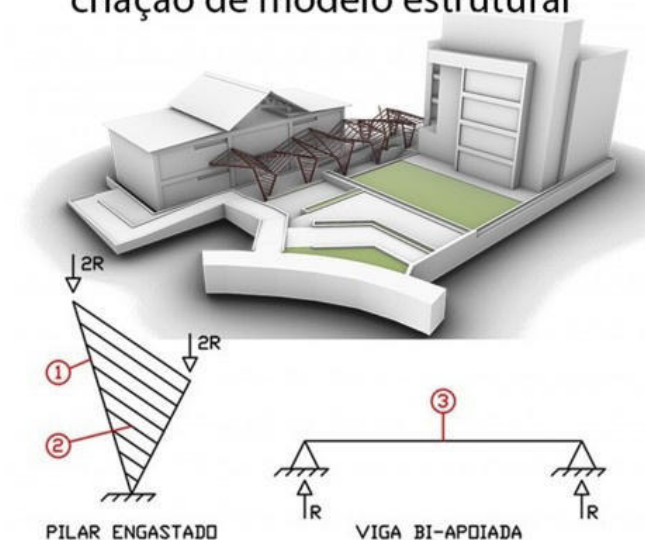
SEMANA 2

Análise de viabilidade construtiva
e estudo volumétrico



SEMANA 3

Modelagem paramétrica e
criação de modelo estrutural



SEMANA 4

Análise estrutural Estudo de materialidade



Processo de projeto do grupo G4-P
Elaboração a partir de acervo dos projetistas

Os profissionais da equipe G5-P idealizaram uma proposta considerando especialmente uma restrição simbólica, baseando a volumetria no formato de ocas indígenas brasileiras. As ações projetuais iniciais vieram acompanhadas do pensamento construtivo, que embasaram cada tipo de solução adotada. Em peculiar, destacam-se os estudos de materialidade desenvolvidos nas duas últimas semanas, que serviram para confirmar e validar as análises de viabilidade construtiva feitas nos estágios mais precoces do processo. Isso incluiu até o desenvolvimento de um *mock-up*.

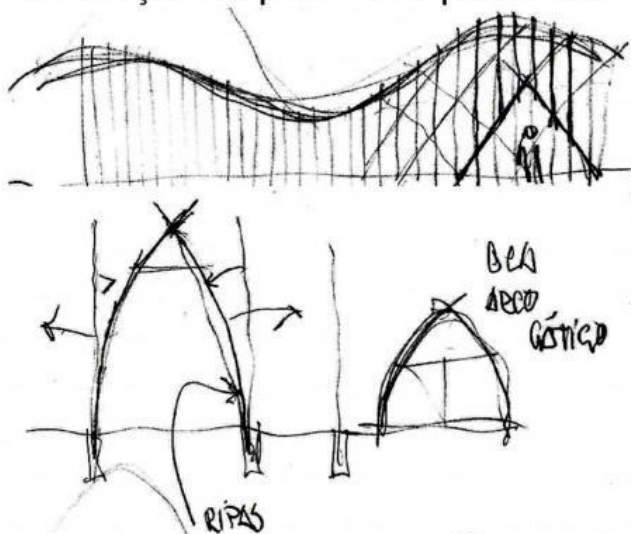


Projeto do grupo G5-P
Elaboração dos projetistas

SEMANA 1

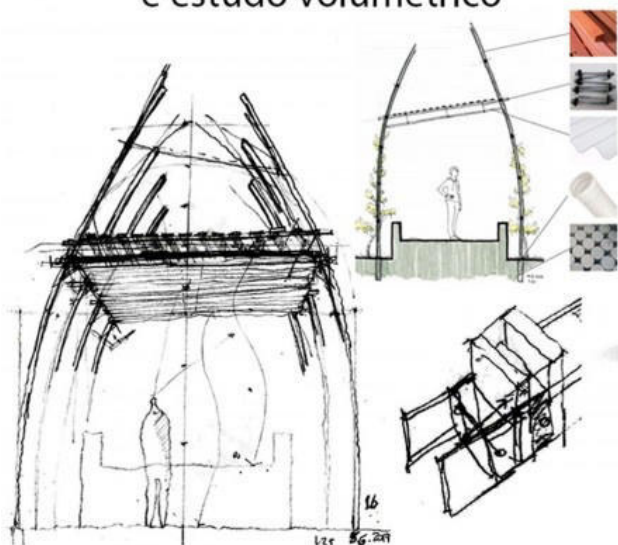
Estudos de referência

Definição do partido arquitetônico



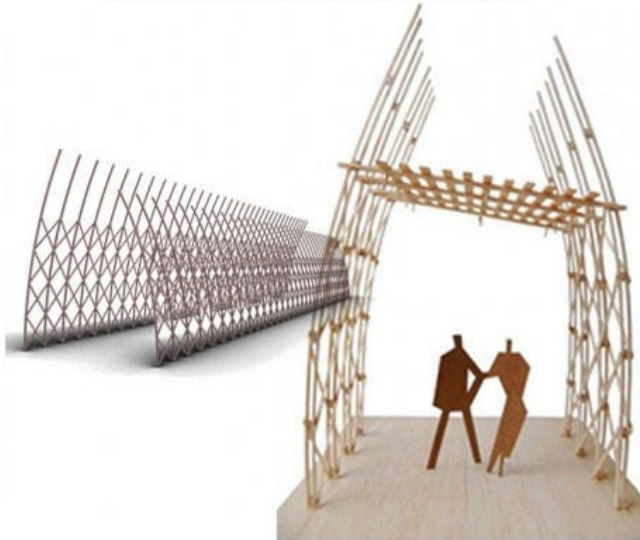
SEMANA 2

Análise de viabilidade construtiva
e estudo volumétrico



SEMANA 3

Modelagem paramétrica e Estudo de materialidade



SEMANA 4

Análise estrutural Estudo de materialidade



Processo de projeto do grupo G5-P
Elaboração a partir de acervo dos projetistas

Apesar de tomarem partido de uma série de ações projetuais distintas, os projetistas do grupo G6-P escolheram caminhos mais simplificados para a geração da forma, sem testar alternativas nem em ferramentas convencionais, nem em paramétricas. A primeira ideia já serviu de base para que fossem feitas as análises de viabilidade construtiva, a criação do modelo estrutural e a análise estrutural. Ao final, criaram um código paramétrico com uma quantidade de informações incompatível com a simplicidade geométrica proposta. A preocupação excessiva com a busca de soluções técnicas triviais para o projeto e o receio de inxequibilidade limitou a liberdade criativa dos projetistas.

Análise dos resultados

Para a análise dos resultados, foi feito o mapeamento das principais ações projetuais adotadas ao longo das quatro semanas dos experimentos de projeto por cada uma das oito equipes envolvidas. Complementarmente, foi feita a identificação temporal da ordem dessas ações, elegendo as quatro principais ações projetuais semanais de cada grupo. A junção dessas duas maneiras de analisar os dados permitiu identificar como a construtibilidade e a parametrização dialogaram ao longo dos processos de projeto. Apesar de os oito experimentos estarem presentes no mesmo estudo, as equipes envolvidas foram separadas em três categorias, uma vez

que a diferença na composição dos grupos não permite a comparação direta dos resultados.

Ao todo, foram detectadas 14 ações projetuais distintas, distribuídas de modo variado ao longo do tempo por cada equipe. As ações projetuais combinaram não apenas habilidades em ferramentas de projeto, mas foram o meio pelo qual os profissionais puderam amadurecer os dilemas projetuais que emergiram durante o processo de projeto.

As principais ações que foram levadas em conta para apreciação do quesito construtibilidade foram análise de viabilidade construtiva (ação 06), criação de modelo estrutural (ação 10), análise estrutural (ação 11) e estudo de materialidade (ação 12).

Foi considerado como análise de viabilidade construtiva (ação 06) um subconjunto de ações mais específicas como: elaboração de detalhes construtivos, quantificação de materiais, orçamentação e estudo de propriedades físicas e de resistência dos materiais. A criação do modelo estrutural tratou da elaboração de um esquema resumido mostrando como os elementos estruturais básicos iriam se interligar e se relacionar. Já a análise estrutural considerou cálculos mais detalhados, realizados manualmente, assim como análises paramétricas das seções, deslocamento, esforço normal e momento fletor.

As ações relacionadas à parametrização foram o planejamento da modelagem paramétrica (ação 07), a Modelagem Paramétrica (ação 08) e a análise de alternativas paramétricas (ação 09). A primeira envolveu o modo pelo qual a lógica do código paramétrico seria criada; a segunda, a parametrização propriamente dita; e a terceira, a análise e escolha de uma das alternativas criadas pelo código, que dependeram diretamente da maneira pela qual a modelagem paramétrica foi concebida, possibilitando variações dentre as quais a mais adequada poderia ter sido escolhida.

Para efeito de separação da natureza das ações, o estudo volumétrico não incluiu a geração paramétrica de alternativas, considerado aqui como um estudo volumétrico "dinâmico", quando várias possibilidades de resultados são apresentadas praticamente de modo simultâneo.

Nos grupos das categorias CE1 e CP1, as principais ações de construtibilidade adotadas foram as de número 06 e 12, uma vez que não existiam engenheiros civis nessas equipes, tampouco arquitetos ou estudantes que tivessem competência para aplicar as ações 10 e 11, específicas da engenharia estrutural.

Os estudantes tiveram mais facilidade para romper a barreira da adoção da nova tecnologia, ocorrida na fase de treinamento, e, assim sendo, conseguiram dedicar mais tempo para a resolução do problema de projeto, apesar de não possuírem prática como projetistas no mercado. Isso fez com que a parametrização se sobrepusesse à construtibilidade.

Já nos grupos G4-P e G5-P, houve uma forte integração entre a construtibilidade e a parametrização, com um alto balanceamento das ações projetuais desses dois quesitos ao longo de todo o processo. O grupo G6-P, por outro lado, priorizou a construtibilidade em detrimento da parametrização, em um processo que não apresentou muitas alternâncias entre ações projetuais dos dois quesitos.

No caso concreto das equipes da categoria CP2, todas as quatro ações relacionadas à construtibilidade foram adotadas (ações 06, 10, 11 e 12), diferindo em intensidade e momento. O mesmo aconteceu com a parametrização do projeto. A articulação entre construtibilidade e parametrização, em cada equipe, fica mais latente quando observada ao longo das semanas em que o projeto foi desenvolvido.

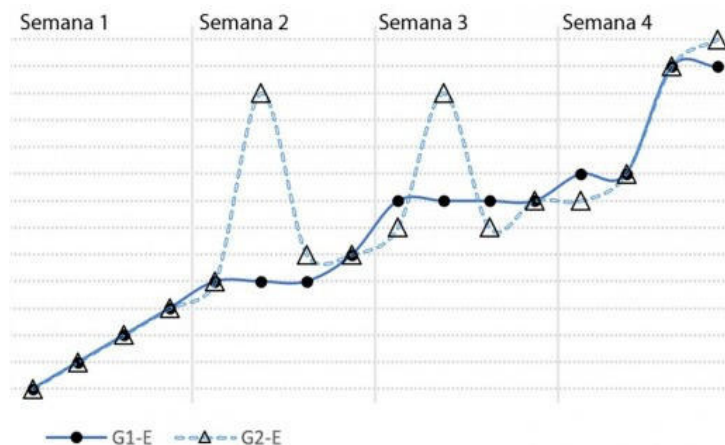
AÇÕES PROJETUAIS	GRUPOS DE ESTUDANTES		GRUPOS DE PROFISSIONAIS					
	G1-E	G2-E	G1-P	G2-P	G3-P	G4-P	G5-P	G6-P
01 Elaboração de cronograma projetual	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
02 Definição da modalidade colaborativa	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
03 Estudo de referências projetuais	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
04 Definição do partido arquitetônico	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
05 Estudo volumétrico	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
06 Análise de viabilidade construtiva	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
07 Planejamento da Modelagem Paramétrica	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
08 Modelagem Paramétrica (MP)	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
09 Análise de alternativas paramétricas	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
10 Criação de modelo estrutural	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
11 Análise estrutural	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
12 Estudo de materialidade	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
13 Documentação do projeto	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
14 Renderizações	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
TOTAL DE AÇÕES REALIZADAS	10	12	11	11	11	13	13	13

Legenda da realização das ações em cada um dos quatro encontros: ● (realizada); Ø (não realizada);
 Ex.: ●●●● - ação não realizada ao longo dos quatro encontros;
 ●●●● - ação realizada no terceiro e quarto encontro.

Tabela com ações projetuais adotadas pelos grupos colaborativos
 Elaboração a partir dos dados da pesquisa

A categoria CE1 mostrou, ao longo do tempo, semelhança em relação ao percurso das ações em função do tempo, com exceção de estudos de materialidade realizados pelo grupo G2-E, que precisou compreender, materialmente, como a expansão e a contração poderiam interferir em sua proposta e nas regras a serem criadas na modelagem paramétrica.

Adicionalmente, o levantamento mostrou que o G2-E investiu mais tempo em análises de viabilidade construtiva, realizando uma alta integração entre construtibilidade e parametrização.



AÇÕES PROJETUAIS

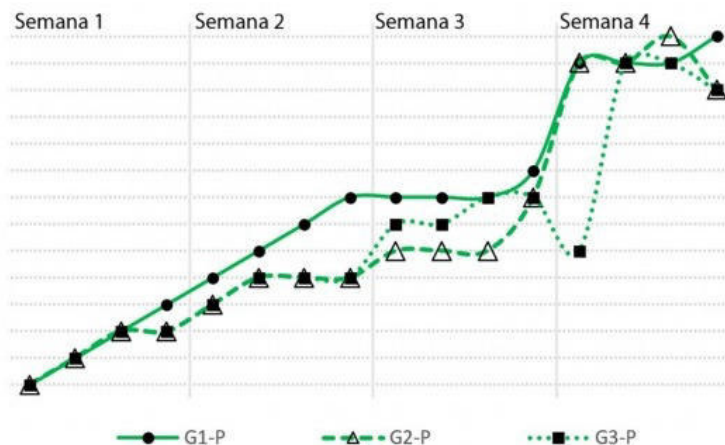
- 14-Rendelizações
- 13-Documentação do projeto
- 12-Estudo de materialidade**
- 11-Análise estrutural
- 10-Criação do modelo estrutural
- 09-Análise de alternativas paramétricas
- 08-Modelagem Paramétrica (MP)
- 07-Planejamento da MP

06-Análise de viabilidade construtiva

- 05-Estudo volumétrico
- 04-Definição de partido arquitetônico
- 03-Estudo de referências projetuais
- 02-Definição de modalidade colaborativa
- 01-Elaboração de cronograma projetual

Ações projetuais da categoria CE1 ao longo das semanas
Elaboração a partir dos dados da pesquisa

Também mostrando certa similaridade nas ações, a categoria CP1 pensou a construtibilidade por meio da análise de viabilidade construtiva em momentos distintos. Os dois primeiros grupos assim o fizeram entre a segunda e terceira semanas, enquanto o terceiro grupo tomou partido dessas ações na iminência da documentação do projeto (produção das representações técnicas). No quesito parametrização, cada grupo trabalhou de modo diferente: o primeiro, dedicando praticamente uma semana inteira, o segundo, utilizando parcialmente a ferramenta, e o terceiro, planejando e modelando parametricamente por uma semana. A combinação que parece ter harmonizado mais no processo de projeto, trazendo menos retrabalhos, foi a do grupo G1-P, que analisou a viabilidade construtiva do edifício em estágio mais precoce, para então partirem para a parametrização.



AÇÕES PROJETUAIS

- 14-Rendelizações
- 13-Documentação do projeto
- 12-Estudo de materialidade**
- 11-Análise estrutural
- 10-Criação do modelo estrutural
- 09-Análise de alternativas paramétricas
- 08-Modelagem Paramétrica (MP)
- 07-Planejamento da MP

06-Análise de viabilidade construtiva

- 05-Estudo volumétrico
- 04-Definição de partido arquitetônico
- 03-Estudo de referências projetuais
- 02-Definição de modalidade colaborativa
- 01-Elaboração de cronograma projetual

Ações projetuais da categoria CP1 ao longo das semanas
Elaboração a partir dos dados da pesquisa

Os grupos que compuseram a categoria CP2 foram os que apresentaram o maior número de ações adotadas. O momento, a intensidade e a alternância de cada ação, no entanto, foi o que mostrou as diferentes maneiras de lidar com o projeto.

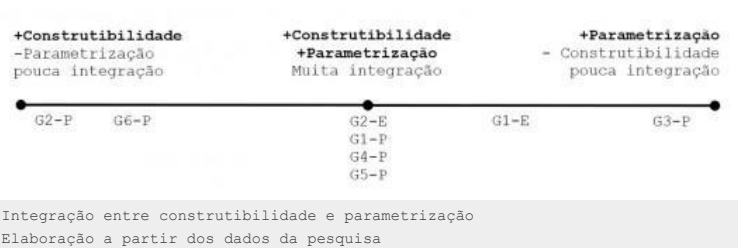
O grupo G4-P foi o que mais se antecipou em discutir as soluções construtivas possíveis, quando na primeira semana já discutiam formas de

apoio e encaixe de suas estruturas em um projeto que nem forma definida tinha. Isso perdurou ao longo das quatro semanas. O grupo G5-P iniciou as análises de viabilidade construtiva a partir da segunda semana, com uma forte alternância entre outras ações e a de número 06. O grupo G6-P, por sua vez, analisou a viabilidade construtiva com maior ênfase apenas na segunda semana, visto que a sua proposta não sofreu alterações desde então. Todos os três grupos tomaram partido da criação de um modelo estrutural e da análise estrutural. Já o estudo de materialidade, surgiu em fase precoce no grupo G5-P, e na última semana, no grupo G4-P, e não foi adotado pelos profissionais do G6-P. De um modo geral, o gráfico chama a atenção em dois momentos: o da adoção precoce da análise de viabilidade construtiva pelo grupo G4-P e o dos constantes estudos de materialidade do grupo G5-P, já presentes a partir da terceira semana.

A parametrização dos três grupos desta categoria apareceu de maneiras distintas. Os profissionais do G4-P combinaram a expertise da engenheira civil em programação com o poder de abstração de um dos arquitetos, desenvolvendo um código altamente integrado às questões construtivas já presentes e àquelas que apareciam ao longo do processo. Isso os permitiu analisar as diferentes alternativas paramétricas com mais confiança, uma vez em que todas as questões construtivas cruciais do projeto eram preservadas. Assim como o grupo anterior, o grupo G5-P desenvolveu um código quando já estavam desenvolvidas muitas questões de viabilidade construtiva. Além disso, foi durante o desenvolvimento do modelo paramétrico que os estudos de materialidade foram feitos, dando ainda mais subsídio ao projeto desenvolvido no meio computacional. O último grupo desta categoria usou a parametrização de maneira menos efetiva, apesar de resolverem bem a questão construtiva. Por terem proposto um projeto menos complexo, desenvolveram a parametrização de seu projeto com uma quantidade de algoritmos bem maior que a média dos outros grupos, em processo pouco automatizado, que não contribuiu muito com o produto projetual final.



No que diz respeito à integração de construtibilidade e parametrização dos processos de projeto analisados, a quantidade de ações relacionadas à construtibilidade e à parametrização nos permitiu identificar três padrões, ao invés dos dois lançados como hipótese: 1) pouca integração, com maior ênfase na construtibilidade; 2) muita integração, com construtibilidade e parametrização plenamente articuladas; e 3) pouca integração, com maior ênfase na parametrização.



Os grupos G2-E, G1-P, G4-P e G5-P foram os que tiveram integração entre construtibilidade e parametrização, confirmando a hipótese lançada. Essa relação equilibrada fez fluir melhor o processo de projeto e gerou um produto projetual mais viável construtivamente equilibrando também a complexidade da forma. Nos demais grupos, a falta de integração trouxe consequências como inviabilidade construtiva, ou pouca exploração de

alternativas projetuais, minimizando a possibilidade de encontrar alternativas paramétricas de forma mais complexa.

Considerações finais

Mostrando os desafios de integração em ambientes de graduação e profissional, os resultados desta investigação trazem aplicações de projetos paramétricos em três diferentes âmbitos de colaboração: acadêmico, profissional unidisciplinar e o profissional multidisciplinar (entre arquitetos e engenheiros civis, no caso estudado). De modo geral, a riqueza de informações dos processos de projeto e dos produtos foi crescente de CE1 a CP2. Apesar da riqueza desse fluxo ser indicada consensualmente por muitos autores, a relevância deste estudo está em trazer como esses resultados foram apresentados: mapeando e categorizando as ações projetuais ao longo do processo de projeto. Isso possibilita um melhor entendimento de como cada uma das ações relativas à construtibilidade e à parametrização interferem em todo o processo de projeto, contribuindo para futuros estudos de indicação de diretrizes metodológicas para projetos paramétricos no âmbito profissional.

O estudo indica ainda o impacto da multidisciplinaridade nos projetos paramétricos, indicando a necessidade de inseri-la desde o âmbito educacional, para que sejam criados cenários em que os estudantes estejam mais próximos da realidade profissional. Nesse sentido, experiências que integrem Departamentos de Arquitetura, Engenharia Civil e da Indústria devem ser encorajados, alavancando uma mudança no cenário da formação dos jovens projetistas.

Outra constatação importante do estudo diz respeito ao papel de arquitetos experientes em projetos paramétricos colaborativos. Esses profissionais foram fundamentalmente importantes para a análise de viabilidade construtiva e nos estudos de materialidade presentes nos processos de projeto dos grupos G4-P e G5-P. A postura desses arquitetos foi, por vezes, mais segura que a dos engenheiros civis, assegurando a construtibilidade sem abrir mão da complexidade gerada pelo modelo paramétrico.

Nesse sentido, independentemente da categoria de colaboração, ficou evidente que estudos de materialização e/ou análises de viabilidade construtiva devem ser adotadas desde os estágios iniciais.

Complementarmente às ações de estudo de materialidade e análise de viabilidade construtiva, as ações lideradas pelos engenheiros civis dos grupos G4-P a G6-P tiveram papel significativo para validar as primeiras formas propostas. As principais foram: 1) criação do modelo estrutural; 2) análise estrutural; 3) análise de viabilidade construtiva, especificamente a concepção de encaixes estruturais entre os subelementos do projeto; e 4) modelagem paramétrica, uma vez que os engenheiros civis tem formação em disciplinas de programação computacional, ainda não presente em currículos dos cursos de arquitetura brasileiros e portugueses.

A integração entre construtibilidade e parametrização traz novos desafios tanto para o contexto acadêmico quanto para o profissional em Arquitetura. O caminho para lidar com essa maneira relativamente recente de projetar exige muita integração entre diferentes áreas do conhecimento, em no âmbito do projeto em colaboração, como defende o manifesto do Novo Estruturalismo. Essa integração pode ser traduzida mais detalhadamente, por meio deste estudo, pela adoção ações projetuais específicas, de modo variado e cíclico, ao longo do processo de projeto, como apresentado especialmente nos grupos que confirmaram a hipótese lançada.

notas

1
ANDRADE, Max Lira; RUSCHEL, Regina Coeli. BIM: Conceitos, cenário das pesquisas publicadas no Brasil e tendências. *Anais do SBQP 2009 - Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído*. São Carlos, Rima Editora, 2009, p. 602-613.

2
KOLAREVIC, Branko. Manufacturing/material/effects. In KOLAREVIC, Branko; KLINGER, Kevin R. (Org.). *Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture*. Nova York, Routledge, 2008. p. 5-24.

3
PICON, Antoine. Architecture and the virtual: towards a new materiality. *Praxis: Journal of Writing+ Building*, n. 6, 2004, p. 114-121.

4
IWAMOTO, Lisa. *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. Nova York, Princeton Architectural Press, 2009.

5
CORDEIRO, Aristóteles Lobo de Magalhães; ROCHA, Germana Costa. Conceber arquitetura com modelos virtuais: a relevância dos sistemas estruturais. In CORDEIRO, Aristóteles Lobo de Magalhães; ROCHA, Germana Costa (Org.), *Modelos em Arquitetura: Concepção e Documentação*. João Pessoa, Editora UFPB, 2017, p. 314.

- 6
AGKATHIDIS, Asterios. *Generative Design*. London, Laurence King Publishing, 2015. *E-book*.
- 7
WOODBURY, Robert. *Elements of Parametric Design*. Nova York, Routledge, 2010. *E-book*.
- 8
SCHEURER, Fabian. Materialising Complexity. *Architectural Design*, Londres, v. 80, n. 4, 2010, p. 86-93.
- 9
DUNN, Nick. *Digital Fabrication in Architecture*. Londres, Laurence King Publishing, 2012. *E-book*.
- 10
MENDELSON, Roy. The Constructibility Review Process: A Constructor's Perspective. *Journal of Management Engineering*, v. 13, n. 3, 1997, p. 17-19.
- 11
CELANI, Gabriela. Uma nova era para a arquitetura. In CELANI, Gabriela; SEDREZ, Maycon (Org.). *Arquitetura Contemporânea e Automação: prática e reflexão*. São Paulo, ProBooks, 2017, p. 17-20; MEHRTENS, Peter. Do projeto à fabricação. In CELANI, Gabriela; SEDREZ, Maycon (Org.). Op. cit., p. 182-188.
- 12
OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. Introduction-The new structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. *Architectural Design*, v. 80, n. 206, 2010, p. 14-23 <<http://books.google.com/books?id=yPaQgAACAAJ&pgis=1>>.
- 13
EZZAT OTHMAN, Ayman Ahmed. Improving Building Performance through Integrating Constructability in the Design Process. *Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal*, [S. l.], v. 3, n. 2, 2011, p. 333-347 <<https://doi.org/10.5592/otmcj.2011.2.6>>.
- 14
SHELDEN, Dennis. *Digital Surface Representation and the Constructability of Gehry's Architecture*. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- 15
EZZAT OTHMAN, Ayman Ahmed. Improving Building Performance through Integrating Constructability in the Design Process. *Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal*, [S. l.], v. 3, n. 2, 2011, p. 333-347 <<https://doi.org/10.5592/otmcj.2011.2.6>>.
- 16
LAWSON, Bryan. *Como arquitetos e designers pensam*. São Paulo, Oficina de textos, 2011.
- 17
MONTEIRO, Verner; VELOSO, Maísa; JANUÁRIO, Pedro. Design collaboration towards constructibility in parametric design process: a design experiment with architecture students. *Anthropologic: Architecture and Fabrication in the cognitive age - Proceedings of the 38th eCAADe Conference*. Volume 1. Berlin, ECAADe, 2020, p. 305-314.
- 18
MONTEIRO, Verner; VELOSO, Maísa; ANDRADE, Heitor. Oficina de Projeto Paramétrico com ênfase na construtibilidade: uma experiência de pesquisa, ensino e extensão. *Revista Projetar - Projeto e Percepção do Ambiente*, v. 4, n. 11, 2019, p. 77-93.
- 19
LAWSON, Bryan. Op. cit.
- 20
LEBAHAR, Jean-Charles. Analyse cognitive de la conception et de sa pédagogie. *Approche didactique de l'enseignement du projet en architecture*. Marselha, Ecole d'Architecture de Marseille-Luminy, 1999. *E-book*.

sobre os autores

Verner Monteiro é arquiteto e urbanista (2006) e mestre em arquitetura (2012) pelo PPAPMA UFRN. Doutorando pelo PPGAU UFRN e pela Faculdade de Arquitetura de Lisboa. É Professor Assistente do Departamento de Arquitetura da UFRN e do IFRN.

Maísa Veloso é arquiteta e urbanista (1985) e mestre em Desenvolvimento Urbano (1989) pela UFPE. Doutora em Urbanismo, Geografia e Ordenamento do Território pela Universidade de Paris III (1997). Professora titular do Departamento de Arquitetura e do PPGAU PPAPMA, da UFRN. Editora-chefe da Revista Projetar.

Pedro Januário é arquiteto e urbanista (1994) pela Universidade de Lisboa e doutor em Arquitetura (2008) pela Universidad Politécnica de Madrid. Professor assistente da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa e da pós-graduação no Cíaud. Coordenador do Laboratório de Prototipagem Rápida.

comentários

