UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

FLÁVIA BICCAS DA SILVA POLONINI

A Modelagem Paramétrica na concepção de formas curvilíneas da Arquitetura Contemporânea

Salvador
2014

FLÁVIA BICCAS DA SILVA POLONINI

A Modelagem Paramétrica na concepção de formas curvilíneas da Arquitetura Contemporânea

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Arivaldo Leão de Amorim

Salvador
2014

Faculdade de Arquitetura da UFBA - Biblioteca

P778m

Polonini, Flávia Biccas da Silva, 1979-
A modelagem paramétrica na concepção de formas curvilíneas da arquitetura contemporânea / Flávia Biccas da Silva Polonini. – 2014.
286 f. : il.

Orientador: Arivaldo Leão de Amorim.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Arquitetura, 2013.

1. Arquitetura. 2. Curvas. 3. Formas. 4. Geometria. 5. Computação gráfica. 6. Modelagem paramétrica. I. Amorim, Arivaldo Leão de. II. Universidade Federal da Bahia. Faculdade de Arquitetura III. Título.

CDU: 72

FLÁVIA BICCAS DA SILVA POLONINI

A MODELAGEM PARAMÉTRICA NA CONCEPÇÃO DE FORMAS CURVILÍNEAS DA ARQUITETURA CONTEMPORÂNEA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia como requisito para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da universidade Federal da Bahia.

Salvador, 20 de maio de 2014.

Banca Examinadora

Arivaldo Leão de Amorim - Orientador_____
Doutor em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo
Universidade Federal da Bahia

Gilberto Corso Pereira_____
Doutor em Geografia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Universidade Federal da Bahia

Wilson Florio_____
Doutor em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo
Universidade Estadual de Campinas e Universidade Presbiteriana Mackenzie

Maria Gabriela Caffarena Celani_____
Livre Docente em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Estadual de Campinas
Universidade Estadual de Campinas

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim, por seu empenho em mostrar os inúmeros caminhos para a produção científica, para mim antes tão restrito, nos quais aprendi a quão obstinada deve ser a procura pela consistência, rigor e clareza em um texto científico.

Aos professores Gabriela Celani, Gilberto Corso e Wilson Flório, por aceitarem participar da banca examinadora e pelas preciosas contribuições quando dos Exames de Qualificação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelos auxílios concedidos sem os quais este trabalho não poderia ser realizado.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Computação Gráfica Aplicada à Arquitetura e ao Desenho (LCAD) da Faculdade de Arquitetura da UFBA pela colaboração e apoio.

Ao LCAD pelo apoio e estrutura disponibilizados.

Aos colegas de mestrado, pela contribuição com idéias, discussões e incentivo contínuo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura da UFBA, pelo apoio dado.

À minha família e aos meus amigos de todos os planos da vida pela inestimável participação em minhas alegrias, pelo incentivo e pelo apoio emocional em todos os momentos.

Especialmente ao meu marido, Gustavo Louzada Polonini, que é minha fé, meu porto seguro e meu modo de vida.

POLONINI, F. B. S. **A modelagem paramétrica na concepção de formas curvilíneas da arquitetura contemporânea**. 286 f. il. 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

RESUMO

Nas últimas décadas, houve novos desenvolvimentos na Geometria, nas ferramentas computacionais aplicadas ao projeto e à construção, que influenciaram os processos de projetação arquitetônica. Principalmente a partir do final da década de 1990, quando surgiu uma diversidade de propostas de paradigmas projetuais digitais, sob a designação de Arquitetura Digital. Como um dos resultados, nota-se um aumento da complexidade das formas propostas na produção arquitetônica contemporânea, em especial, a renovação do interesse por formas curvilíneas. Desempenhando um papel importante nessa situação, encontra-se a Modelagem Paramétrica, uma vez que possui recursos particularmente adequados a dar suporte à concepção dessas formas. Como ainda é uma ferramenta pouco explorada no Brasil, o presente trabalho propõe estudar os aspectos tecnológicos da Modelagem Paramétrica na fase de concepção de projetos arquitetônicos contemporâneos que possuam a forma principal curvilínea. Para tanto, elabora um vocabulário formado, por um lado, de recursos e ferramentas da geometria sobre as representações, transformações e análises de formas curvas, e por outro lado, de uma gama de técnicas de modelagem geométricas. Esse vocabulário será utilizado na análise tanto das formas da coletânea representativa das obras mais emblemáticas da Arquitetura Contemporânea, quanto na aplicação direta da Modelagem Paramétrica ao se modelar três dessas obras. Com isso, procura-se refletir sobre os procedimentos técnicos adotados nessa modelagem, de modo a apontar as capacidades e as limitações da aplicação da Modelagem Paramétrica para a concepção da forma arquitetônica. E confirmar que essas ferramentas possuem versatilidade de uso e potencial para explorar construções geométricas cada vez mais complexas, principalmente mediante variações paramétricas, assim ampliando as possibilidades de concepção formal de obras arquitetônicas.

Palavras chave: Arquitetura Contemporânea; Formas Curvilíneas; Modelagem Paramétrica; Concepção da Forma Arquitetônica; Geometria;

POLONINI, F. B. S. **Parametric modeling in the generation of curvilinear forms of the contemporary architecture**. 286 f. il. 2014. Master dissertation – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

ABSTRACT

In recent decades, there have been new developments in Geometry, in the tools of computer aided design and construction, which influenced the methods of architectural design. Mainly, from the late 1990s, when appeared a variety of propositions for digital design paradigms, under the name of Digital Architecture. As one of the results, there is a growing formal complexity in design of Contemporary Architecture, in particular, the renovation of interest in curvilinear forms. Playing a key role in this situation, lies Parametric modeling, in view of the fact that it has features particularly suitable to support the design of these forms. As this tool is still under explored in Brazil, this dissertation proposes to study the technological aspects of Parametric Modeling in the design phase of contemporary architectural projects, which have the main form curvilinear. In order to do so, elaborates a vocabulary formed by, on the one hand, geometry resources and tools to represent, to transform and to analyze the curved forms, and on the other hand, a range of geometric modeling techniques. This vocabulary is used in the analysis of the forms of the buildings contained within the collection that are representative of the most emblematic works of Contemporary Architecture, and also the analysis of direct application of Parametric Modeling on the modeling three buildings from that collection. With that procedure, this dissertation seeks to ponder on the technical procedures adopted in that modeling, in order to point out the skills and restrictions of the application of Parametric Modeling for the design of architectural form. And confirm that these tools have potential use and versatility to explore increasingly complex geometric constructions, mainly by use of parametric variations, thus expanding the possibilities for formal design of architectural projects.

Keywords: Contemporary Architecture; Curvilinear Forms, Parametric Modeling, Design of Architectural Form; Geometry;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dois exemplos da aplicação de vistas ortográficas em formas curvas 22
Figura 2 – (a) Modelo funicular da Igreja da Colônia Güell de Antoni Gaudí; (b) Modelo de um pavilhão em película de sabão para estudar superfícies mínimas criado por Frei Otto 23
Figura 3 – Criação de uma superfície regrada pela rotação de uma reta 24
Figura 4 – Os mais recentes métodos de representação de modelos geométricos utilizados em ferramentas CAD 26
Figura 5 – Sketchpad sendo usado 33
Figura 6 – URBAN5 do Nicholas Negroponte e Groisser, de 1968 34
Figura 7 – "DAC-1" system (Design Augmented by Computers) 34
Figura 8 – Computador Macintosh da Apple em 1984 37
Figura 9 – Exemplos de variações alcançadas com a criação automatizada 42
Figura 10 – Modelo geométrico da escultura do peixe no CATIA 44
Figura 11 – Visualização do modelo molecular da bicamada de fosfolípido que forma a membrana em torno de todas as células vivas 46
Figura 12 – (a) Análise FEM dos esforços da BMW Bubble de Bernad Franken; (b) análise CFD do fluxo de ar do Project ZED de Future Systems 47
Figura 13 – “Watercube” National Swimming Pool, PTW Architects, 2007 48
Figura 14 – Endless House de Frederick Kiesler 50
Figura 15 – Bubble BMW Pavilion 51
Figura 16 – Modelo geométrico do Restaurante Le Georges: (a) perspectiva; (b) vista superior 51
Figura 17 – Processo de fabricação digital de parte do Der Neue Zollhof 52
Figura 18 – Birmingham Selfridges Store: (a) Fotografia da entrada; (b) planta de situação 53
Figura 19 – The Yas Hotel, Asymptote, 2009 54
Figura 20 – (a) Protótipo do estudo sobre malhas hexagonais do mestrado de Andrew Kudless (2004); (b) AA Membrane Canopy - cobertura projetada e construída pelos estudantes de mestrado de 2007 do Architectural Association 55
Figura 21 – 30 St Mary Axe: (a) esquema representando modelo paramétrico; (b) elevação 56
Figura 22 – Linguagem de programação: (a) visual; (b) em texto 57
Figura 23 – Diferentes modelos “BIM” das diferentes disciplinas da área de AEC para o mesmo edifício... 60
Figura 24 – Esquema mostrando os diferentes tipos de informação que uma ferramenta BIM produziria 61
Figura 25 – Exemplo de possíveis ações das *constraints* de Sutherland 64
Figura 26 – (a) Modelo paramétrico ou implícito; (b) modelo geométrico ou explícito 67
Figura 27 – Diferentes formas geométricas criadas pela variação das coordenadas 68
Figura 28 – “Diferentes formas” criadas pela variação das dimensões dos lados 68
Figura 29 – (a) Modelo paramétrico de uma coluna; (b) Família de colunas 70
Figura 30 – Grafo representando as relações existentes na meta-estrutura interna de um elemento..... 71
Figura 31 – Exemplo não associativo: (a) antes de mover a esfera; (b) depois de mover a esfera 73
Figura 32 – Exemplo associativo: dois movimentos com a esfera e que a linha acompanha 73
Figura 33 – Variações paramétricas da treliça de estrutura recíproca 74
Figura 34 – Exemplo de associações entre relações 74
Figura 35 – Exemplo de *features* de fabricação em uma peça 76
Figura 36 – Curva construída pela junção de arcos circulares 82

Figura 37 – Curvatura principal 85
Figura 38 – Relação entre as classes de geometrias de Klein 90
Figura 39 – Sequência de construção da Curva Koch 91
Figura 40 – (a) Toro; (b) Garrafa de Klein; (c) Esfera; (d) Plano Projetivo; (e) Fita de Möebius 93
Figura 41 – Sequência da deformação do Toro em uma caneca 94
Figura 42 – Superfícies e suas planificações 95
Figura 43 – Helicóide axial de plano diretor (a) e cone diretor (b); (c) parabolóide hiperbólico; (d) conóide 96
Figura 44 – Hiperbolóide de revolução de uma (a) e duas folhas (b); (c) elipsóide; (d) toro circular; (e) sepertina 96
Figura 45 – (a) toro elíptico; (b) toro hiperbólico; (c) parabolóide elíptico 97
Figura 46 – Cilindros de 2ª ordem: (a) cilindro parabólico; (b) cilindro hiperbólico 97
Figura 47 – (a) Interpolação; (b) aproximação 99
Figura 48 – (a) Sem continuidade; (b) G^0; (c) G^1; (d) G^2..... 100
Figura 49 – (a) Valores das variáveis; (b) gráfico resultante com movimento do ponto 102
Figura 50 – Elementos da curva de Hermite 103
Figura 51 – Diferentes resultados obtidos pela alteração na direção da tangente inicial (T1) da curva de Hermite 103
Figura 52 – Efeito da variação do comprimento do vetor da curva Hermite 103
Figura 53 – Exemplo de uma Hermite composta (*piecewise*) 104
Figura 54 – Curvas Bézier de diferentes graus (*degree*) 105
Figura 55 – Curva Bézier cúbica 105
Figura 56 – Simulação do fecho convexo em curvas Bézier 106
Figura 57 – Curva Bézier fechada 106
Figura 58 – Curva Bézier composta (*piecewise*) 107
Figura 59 – Simulação de uma curva Bézier composta sendo alterada 107
Figura 60 – (a) *Spline* uniforme; (b) *Spline* não uniforme 109
Figura 61 – Elementos da B-spline 109
Figura 62 – (a) *Spline* de grau 2; (b) *Spline* de grau 3 110
Figura 63 – Controle local na B-spline 110
Figura 64 – Variação de valores de peso: (a) criam as cônicas; (b) três valores diferentes 112
Figura 65 – Superfície gerada pelo movimento da curva (em vermelho) no espaço a cada instante *t*, com alterações da posição dos seus pontos internos em "*u*" 113
Figura 66 – Duas superfícies regradas combinadas por interpolação bi-linear 114
Figura 67 – Curvas paramétricas combinadas por interpolação bi-cúbica 114
Figura 68 – (a) Malha de controle em superfície Bézier; (b) poliedro de controle 114
Figura 69 – Formas primitivas 116
Figura 70 – Manipulação de uma forma livre (*Free-form*) 116
Figura 71 – Exemplo de produção de superfície curva por seção transversal 117
Figura 72 – Geração de superfície curva por varredura 117
Figura 73 – À esquerda forma plana que ao sofrer a extrusão produz a superfície à direita 118
Figura 74 – Dois exemplos de geração de superfície por revolução 118
Figura 75 – Exemplo de geração de superfície tubular 119
Figura 76 – Geração de superfície por quatro caminhos 119

Figura 77 – (a) translação; (b) rotação; (c) espelhamento 121
Figura 78 – (a) Escala; (b) *Shear*; (c) *Stretch* 121
Figura 79 – Exemplos de manipulação de forma livre mediante transformações geométricas 122
Figura 80 – (a) Cubos A e B; (b) União; (c) Interseção; (d) Diferença 123
Figura 81 – *Blend*: (a) em aresta; (b) em vértice; (c) superfície de transição entre duas esferas que não se cruzam; 123
Figura 82 – Etapas de uma sequência de *morphing* entre dois objetos volumétricos 124
Figura 83 – (a) Esfera; (b) *warp* da esfera; (c) deformação da malha; (d) resultado da deformação 124
Figura 84 – Sequência de aproximação de dois objetos implícitos 125
Figura 85 – Três níveis de aplicação da gramática à forma inicial 127
Figura 86 – Cinco níveis de aplicação do Lindenmayer System 127
Figura 87 – Forma inicial “evoluindo” para uma forma complexa 128
Figura 88 – Nationale-Nederlanden Building: (a) vista da fachada mostrando as duas torres; (b) planta baixa 135
Figura 89 – Nationale-Nederlanden Building: (a) corte longitudinal; (b) modelo geométrico no CATIA 136
Figura 90 – FreshWater Pavilion: (a) vista aérea; (b) planta baixa 137
Figura 91 – Sequência de modelagem da forma externa do FreshWater Pavilion 139
Figura 92 – FreshWater Pavilion: (a) interior do edifício; (b) estrutura metálica 139
Figura 93 – Museu Guggenheim de Bilbao: (a) vista da fachada a partir do rio;(b) planta de situação 140
Figura 94 – Estudos volumétricos do museu: (a) primeira versão em papel; (b) versão após deformação 141
Figura 95 – Museu Guggenheim de Bilbao: (a) superfícies de varredura na forma do museu; (b) análise da curvatura gaussiana das superfícies 141
Figura 96 – Museu Guggenheim de Bilbao: (a) esquema ilustrativo da identificação dos volumes; (b) modelo geométrico do sistema estrutural; 142
Figura 97 – Centro de Mídia Natwest: (a) vista da fachada; (b) esquema ilustrando corte parcial em perspectiva axonométrica 143
Figura 98 – Centro de Mídia Natwest: planta baixa do 1º pavimento e do mezanino 143
Figura 99 – Centro de Mídia Natwest: (a) edifício sendo construído no estaleiro; (b) corte transversal 144
Figura 100 – Bubble BMW Pavilion: vista da fachada, mostrando a volumetria 144
Figura 101 – Sequência de imagem demonstrando a modelagem por *metaball* 145
Figura 102 – Bubble BMW Pavilion: (a) análise pelo método de elementos finitos; (b) modelo geométrico da estrutura em grelha 145
Figura 103 – Bubble BMW Pavilion: sequência de fabricação dos painéis de acrílico curvo 146
Figura 104 – Sala de conferências do Banco DZ: (a) vista aérea; (b) vista interior, mostrando a sala de conferência 146
Figura 105 – Sala de conferências do Banco DZ - corte longitudinal: (a) esquemático; (b) em maquete; 147
Figura 106 – Sala de conferências do Banco DZ - modelo geométrico no CATIA: (a) superfície externa; (b) estrutura 148
Figura 107 – Sala de conferências do Banco DZ - Prensagem hidráulica: (a) chapa sendo prensada no molde; (b) chapa conformada 148
Figura 108 – Quadracci Pavilion: vista área, mostrando a volumetria da edificação 149
Figura 109 – Quadracci Pavilion: planta baixa 150
Figura 110 – Quadracci Pavilion: corte longitudinal 150
Figura 111 – Eden Project, proposta baseada: (a) no terminal de Waterloo; (b) em cúpulas geodésicas 151
Figura 112 – Eden Project: "Tri-Hex-Net": (a) perspectiva; (b) em vista 152

Figura 113 – Eden Project, painel de ETFE: (a) fotografia em detalhe; (b) vista aérea 152
Figura 114 – Desenho mostrando as esferas referenciais das cúpulas: (a) planta; (b) vista 153
Figura 115 – (a) vista lateral do London City Hall; (b) esquema ilustrativo da inclinação do edifício 153
Figura 116 – Modelo geométrico: (a) vista da fachada norte com a cortina de vidro; (b) vista lateral do edifício, mostrando a curvatura da cortina, à esquerda e os degraus invertidos, à direita 154
Figura 117 – Sequência de imagens da análise acústica da assembléia 155
Figura 118 – Estudos volumétricos utilizando a prototipagem rápida 155
Figura 119 – Desenvolvimento dos troncos de cone e sua identificação 156
Figura 120 – Complexo Esplanade: (a) maquete do concurso; (b) planta baixa 157
Figura 121 – Detalhe da treliça espacial mostrando seu módulo poliédrico 158
Figura 122 – Detalhe da vista da fachada mostrando a proteção solar 158
Figura 123 – Loja Selfridges de Birmingham: (a) vista aérea da edificação; (b) planta de situação 159
Figura 124 – Loja Selfridges de Birmingham: (a) corte esquemático em perspectiva;(b) vista da lateral do edifício, mostrando as entradas 160
Figura 125 – Loja Selfridges de Birmingham: fachada desenvolvida em plano 160
Figura 126 – (a) forma da laje em malha ortogonal; (b) forma da laje em formato irregular; (c) projeção do concreto sobre a armação da fachada 161
Figura 127 – Análise por elementos finitos da estrutura: (a) passarela; (b) fachada 161
Figura 128 – Museu Kunsthaus de Graz: (a) vista aérea do entorno da edificação; (b) planta de situação 162
Figura 129 – (a) esquema ilustrativo dos elementos do edifício; (b) detalhe, destacando um nozzle 163
Figura 130 – BIX: (a) fotografia do BIX funcionando; (b) perspectiva explodida 163
Figura 131 – (a) modelagem de formas livres da superfície do museu; (b) análise de elementos finitos; (c) modelo geométrico da estrutura treliçada do museu 164
Figura 132 – Walt Disney Concert Hall: (a) vista da fachada; (b) planta baixa do sexto andar 165
Figura 133 – Walt Disney Concert Hall: (a) vista A; (b) vista B; 165
Figura 134 – Walt Disney Concert Hall: (a) vista C; (b) vista D; 165
Figura 135 – Sala principal: (a) estudos em modelos físicos; (b) maquete em grande escala para realizar análise acústica 166
Figura 136 – Análise da curvatura gaussiana das superfícies: (a) das superfícies externas do WDCH; (b) das superfícies internas do Founders Room; 166
Figura 137 – Colaboração entre diferentes profissionais na Caverna de Realidade Virtual 167
Figura 138 – Auditório de Tenerife: (a) fachada destacando a volumetria da edificação; (b) planta de situação 169
Figura 139 – Auditório de Tenerife: (a) vista lateral; (b) vista da frente 168
Figura 140 – 30 St. Mary Axe: (a) fachada destacando a volumetria da edificação; (b) planta de situação 170
Figura 141 – (a) simulação numérica de correntes de vento sobre o edifício; (b) comparação do desempenho aerodinâmico da forma ogival com a prismática 170
Figura 142 – (a) planta baixa “estrelada”; (b) modelo geométrico: rotação dos pavimentos para criar átrio contínuo 171
Figura 143 – (a) vista interna da treliça; (b) detalhe da padronização da cortina de vidro 171
Figura 144 – Diferentes formas, resultado de variação dos parâmetros 172
Figura 145 – Centro Musical Sage de Gateshead: (a) vista da edificação às margens do rio Tyne; (b) estudos volumétricos 173
Figura 146 – Centro Musical Sage de Gateshead: (a) modelo geométrico com a cobertura sem revestimento; (b) planta baixa do térreo 173

Figura 147 – Centro Musical Sage de Gateshead: (a) curval espiral em três arcos para criar a curva diretriz; (b) resultado no corte transversal 174
Figura 148 – Centro Musical Sage de Gateshead: concordância entre 9 arcos para criar a curva geratriz 175
Figura 149 – Centro Musical Sage de Gateshead: resultado da concordância no corte longitudinal 175
Figura 150 – (a) maquete do sistema estrutural, mostrando os dois níveis mais altos; (b) detalhe da estrutura mostrando os elementos do nível três 176
Figura 151 – (a) os dois tipos de revestimento da cobertura; (b) visão do rio do interior da edificação 176
Figura 152 – Torre Agbar: (a) planta de situação; (b) vista aérea do entorno 177
Figura 153 – Torre Agbar: (a) volumetria da edificação com iluminação; (b) corte transversal 177
Figura 154 – Torre Agbar: (a) distribuição das aberturas desenvolvida em plano; (b) distribuição das cores do revestimento em alumínio 178
Figura 155 – Torre Agbar: protótipo do sistema de brises da fachada 178
Figura 156 – HSB Turning Torso: (a) estudo da volumetria inicial do edifício; (b) vista da fachada 179
Figura 157 – HSB Turning Torso: (a) esquema ilustrativos dos elementos do edifico; (b) planta pavimento tipo 180
Figura 158 – Estádio Allianz Arena: (a) vista da fachada; (b) planta de situação 181
Figura 159 – Estádio Allianz Arena: (a) detalhe do corte; (b) vista aproximada dos painéis de ETFE 182
Figura 160 – Estádio Allianz Arena: (a) painéis de ETFE; (b) montagem fotográfica mostrando as cores da iluminação 182
Figura 161 – Peek & Cloppenburg: (a) planta de situação; (b) vista aérea 183
Figura 162 – Corte transversal mostrando a secção em formato próximo: (a) à elipse; (b) ao quadrante da elipse 184
Figura 163 – (a) perímetro da fachada em planta baixa; (b) alinhamento do eixo principal da fachada com o perímetro; (c) secção elíptica 184
Figura 164 – (a) Esboço do modelo paramétrico para a geração da fachada; (b) modelo geométrico da estrutura 185
Figura 165 – Esquema de representação gráfica de um algoritmo 190
Figura 166 – Interface de linguagem de programação: (a) por linha de comando do Rhinoscript; (b) iconográfica do GH 190
Figura 167 – Três pontos criados no GH (janela da frente) e representados no Rhinoceros (janela de fundo). 191
Figura 168 – Conectando os ícones dos pontos A e B (à esquerda) com o ícone da linha (à direita) no GH.... 191
Figura 169 – Modelagem de um triângulo pelo GH 192
Figura 170 – Variação do modelo devido a alteração no valor do raio das circunferências 193
Figura 171 – Visualização do menu com as opções de operações da categoria funções matemáticas e funções lógicas 196
Figura 172 – Operações da categoria curvas 196
Figura 173 – Operações da categoria superfície 197
Figura 174 – Operações da categoria *mesh* 197
Figura 175 – Operações da categoria vetores 198
Figura 176 – Operações da categoria interseções 198
Figura 177 – Operações da categoria transformações 199
Figura 178 – Operações da categoria operações de manipulação de dados 199
Figura 179 – Volumetria do Estádio Allianz 200
Figura 180 – Esquema com forma geral do estádio e suas dimensões máximas 201
Figura 181 – Representação esquemática da hierarquia do processo de modelagem 201

Figura 182 – Alinhamento entre corte e planta de cobertura, na qual se tem a indicação do corte 203
Figura 183 – Alinhamento entre as diretrizes (em amarelo) e geratriz (em vermelho) 204
Figura 184 – Superfície de referência gerada por varredura: (a) em perspectiva; (b) em planta; 205
Figura 185 – Geratrizes da malha sobre superfície de referência: direção “u” em amarelo e direção “v” em azul 205
Figura 186 – Exemplos de malhas, em verde: (a) 8 geratrizes em “u” e 33 em “v”; (b) 32 geratrizes em “u” e 112 em “v” 206
Figura 187 – Sequência de construção do gabarito 207
Figura 188 – Elemento padrão de fechamento; (a) vista superior; (b) em perspectiva 207
Figura 189 – Exemplo de aplicação do *morphing*: (a) antes; (b) depois 208
Figura 190 – Inserção do elemento padrão de fechamento na caixa fonte: (a) vista superior; (b) em perspectiva 208
Figura 191 – Allianz Arena: (a) foto aérea da edificação; (b) modelo geométrico do estudo 1 criado no GH 209
Figura 192 – Allianz Arena: (a) foto da edificação conluída; (b) modelo geométrico do estudo 1 criado no GH 209
Figura 193 – Definition correspondente ao modelo geométrico final do estádio 210
Figura 194 – Variações do número de geratrizes da malha modeladora nas direções “u” e “v” 211
Figura 195 – Variações na forma elemento padrão de fechamento: (a) elemento padrão; (b) resultado do morphing 211
Figura 196 – Variações na forma elemento padrão de fechamento: (a) elemento padrão; (b) resultado do morphing 211
Figura 197 – Fachada do HSB Turning Torso 212
Figura 198 – (a) planta do pavimento tipo com ambientação; (b) corte esquemático 213
Figura 199 – Detalhe do posicionamento do cilindro na planta do “pavimento tipo” 217
Figura 200 – Contorno do pavimento tipo: trechos curvos, em amarelo, e trechos retos, em vermelho 218
Figura 201 – Conjunto dos seis perímetros, depois de serem copiados na direção vertical 218
Figura 202 – Resultado do estágio a.3: contorno de todos os pavimentos 219
Figura 203 – Os 54 pavimentos rotacionados: (a) em perspectiva; (b) em planta baixa 220
Figura 204 – (a) superfície criada pelo *loft* dos seis primeiros pavimentos; superfícies laterais de todos os blocos criadas pelo *loft*: (b) em perspectiva; (c) em planta baixa 220
Figura 205 – Visualização das lajes dos pavimentos em vermelho e superfície externa do bloco em verde translúcido 221
Figura 206 – (a) representação esquemática das sete faces da superfície lateral externa do bloco de pavimentos; (b) sobreposição da malha na fachada da edificação, indicando a disposição em matriz 221
Figura 207 – Seleção da face: (a) face maior; (b) face menor; 222
Figura 208 – Modelo geométrico da definição da malha sobre face selecionada, em verde: (a) matriz 1; (b) matriz 2 223
Figura 209 – Os três modelos de painéis pré-fabricados de fechamento da fachada da edificação 223
Figura 210 – Resultado da aplicação do morphing, em verde: (a) matriz 1; (b) matriz 2. 224
Figura 211 – Repetição do procedimento de modulação: (a) nas outras faces do bloco; (b) demais blocos..... 225
Figura 212 – (a) Em verde: pontos de referência; (b) curva (em verde) passando através dos pontos (em vermelho); (c) esquema ilustrativo dos elementos da treliça em relação a planta pavimento tipo 226
Figura 213 – Em verde, correção de afastamento e origem: (a) encostado a edificação; (b) afastado uniformemente da edificação; Em verde, correção de origem: (c) tirante termina na altura que o bloco está do solo; (d) tirante em contato com o solo 226

Figura 214 – Em verde, superfície cilindróide do tirante: (a) em perspectiva; (b) em planta; (c) módulo de criação das barras 227
Figura 215 – Turning Torso: (a) foto da edificação concluída; (b) modelo geométrico do estudo 2 criado no GH 229
Figura 216 – Turning Torso: (a) foto de detalhe; (b) modelo geométrico parcial do estudo 2 criado no GH .. 229
Figura 217 – Definition correspondente ao modelo geométrico final do Turning Torso 230
Figura 218 – Definition correspondente ao modelo geométrico do núcleo cilíndrico de concreto 230
Figura 219 – Definition correspondente a modelagem da superfície externa dos blocos de pavimentos da edificação 231
Figura 220 – Definition correspondente a modulação da fachada de um bloco com os elementos de fechamento 232
Figura 221 – *Definition* correspondente a matriz 1 233
Figura 222 – *Definition* correspondente a modelagem da superfície da treliça metálica 233
Figura 223 – *Definition* correspondente a modelagem da superfície do elemento vertical 234
Figura 224 – *Definition* correspondente a modelagem da superfície das barras de ancoragem a partir do módulo 235
Figura 225 – Simulação da disposição das janelas nas fachadas, matriz: (a) 2 x 6; (b) 3 x 4; (c) 6 x 8; (d) 9 x 2 236
Figura 226 – Volumetria do 30 St. Mary Axe 237
Figura 227 – (a) Planta baixa do “pavimento tipo”; (b) elevação; (c) desenho esquemático do corte 238
Figura 228 – Alinhamento entre planta do “pavimento tipo” e elevação da edificação 242
Figura 229 – (a) perímetro da “planta tipo”, trechos curvos em amarelo e trechos retos em vermelho; 40 perímetros: (b) em perspectiva; (c) sobrepostas a elevação da edificação 243
Figura 230 – 40 contornos de pavimentos rotacionados: (a) em perspectiva; (b) em planta baixa 244
Figura 231 – Em amarelo e vermelho: (a) pontos de passagem da treliça em cada pavimento e suas designações; (b) hélices formadas pela trajetória dos pontos em uma direção; (c) esquema ilustrativo da série de pontos com mesma designação 244
Figura 232 – (a) seleção de todos os pontos P1; Conjunto de 18 hélices cilíndricas (diretrizes) em sentido anti-horário, em verde: (b) em perspectiva; (c) em elevação 245
Figura 233 – (a) Em vermelho, 18 geratrizes na base de cada diretriz (em verde); Superfície de varredura dos 18 elementos verticais, em azul: (a) em perspectiva; (b) em elevação 246
Figura 234 – Dois conjuntos de 18 elementos verticais da treliça: (a) em perspectiva; (b) em elevação 246
Figura 235 – (a) diretriz (em amarelo) e geratriz (em vermelho) perpendicular entre si; (b) em magenta, superfície de revolução (aro); (c) resultado do estágio b.4: todos os aros 247
Figura 236 – Em vermelho: (a) pavimentos antes de serem escalados; (b) pavimentos escalados e ajustados à elevação do edifício 248
Figura 237 – (a) treliça composta de “hélices cilíndricas”; treliça composta de “hélices ogivais” (b) em elevação; (c) em perspectiva 249
Figura 238 – Geratriz e superfície de revolução: (a) em amarelo, curva perfil da edificação; (b) geratriz alinhada com a planta; (c) superfície em perspectiva; (d) superfície sobreposta à elevação 250
Figura 239 – (a) em verde, malha da modulação; (b) Em vista aproximada: malha da modulação (em verde), diagonais (diretriz - em azul) e quadrados (geratriz - em amarelo); (c) Em perspectiva aproximada e sem visualização da malha: diagonais (diretriz - em azul) e quadrados (geratriz - em amarelo) 251
Figura 240 – 30 St. Mary Axe: (a) vista da edificação concluída; modelo geométrico do estudo 3 criado no GH em perspectiva (b) e em vista (c) 251
Figura 241 – 30 St. Mary Axe: (a) fotografia aproximada da fachada da edificação; (b) detalhe aproximado do modelo geométrico em vista 252

Figura 242 – Definition correspondente ao modelo geométrico final do 30 St. Mary Axe 252
Figura 243 – Definition correspondente cópias, rotação e aplicação de escala nos perímetros do “pavimento tipo” da edificação 253
Figura 244 – Definition correspondente a construção dos elementos verticais (hélices) 254
Figura 245 – Definition correspondente a construção dos elementos horizontais (aros) 254
Figura 246 – Definition correspondente a modelagem da cortina de vidro 255

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Esquema de geração de forma por desempenho, mostrando a trajetória dos ventos antes e depois das modificações na parede 55
Quadro 2 – Tabela comparativa entre as Geometrias Hiperbólica, Euclidiana e Elíptica 88
Quadro 3 – Fontes Bibliográficas do levantamento 131
Quadro 4 – Termos e/ou expressões utilizadas na pesquisa 132
Quadro 5 – Livros utilizados no refinamento 133
Quadro 6 – Revistas utilizadas no refinamento 133
Quadro 7 – Lista de obras selecionadas para a coletânea 135
Quadro 8 – Obras selecionadas para os Estudos Empíricos 186
Quadro 9 – Esquema ilustrativo da indexação dos elementos de uma superfície por uma árvore de dados 194
Quadro 10 – Quadro síntese da gama de componentes do GH 195
Quadro 11 – Quadro síntese do processo de modelagem do Allianz Arena 202
Quadro 12 – Quadro síntese do processo de modelagem do Turning Torso 214
Quadro 13 – Em verde, seqüência de modelagem das barras: (a) par superior; (b) par inferior; (c) repetindo os módulos ao longo da edificação 228
Quadro 14 Variações do número de blocos dos andares 235
Quadro 15 – Simulação da rotação dos blocos 236
Quadro 16 – Quadro síntese do processo de modelagem do 30 St. Mary Axe 239
Quadro 17 – Variações do número de pavimentos da edificação 256
Quadro 18 – Variações do número de pavimentos a receberam a aplicação da escala 256
Quadro 19 – Efeitos na treliça resultante das variações no ângulo de rotação dos pavimentos 257
Quadro 20 – Variação nos valores da função parábola 258
Quadro 21 – Aplicação da função Perlin ao invés da parábola 258

LISTA DE SIGLAS

AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
BIM	Building Information Modeling
BIX	Big Pixel
B-rep	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
CAGD	Computer Aided Geometric Design
CAM	Computer Aided Manufecture
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CFD	Computational Fluid Dynamics
CG	Computação Gráfica
CN	Controle Numérico
CNC	Computer Numerical Control
CSG	Constructive Solid Geometry
CumInCAD	Cumulative Index of Computer Aided Architectural Design
DF	Digital Fabrication
ETFE	Politetrafluoretileno
FEM	Finite Element Method
GH	Grasshopper
GUI	Graphical User Interface
ISO	International Organization for Standardization
LS	Lindenmayer Systems
MG	Modelagem Geométrica
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MP	Modelagem Paramétrica
NURBS	Non Uniform Rational Basis Spline
PC	Personal Computer
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
WDCH	Walt Disney Concert Hall

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19

1.1 Temática 19
1.2 Objetivos 27
1.3 Abordagem metodológica 28
1.4 Estrutura do trabalho 28

2 AS TECNOLOGIAS DO PROJETO AUXILIADO POR COMPUTADOR 30

2.1 EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS COMPUTACIONAIS APLICADAS AO PROJETO... 30

2.1.1 A Origem da Tecnologia CAD 31
2.1.2 Década de 1960 33
2.1.3 Década de 1970 35
2.1.4 Década de 1980 36
2.1.5 Década de 1990 42
2.1.6 Década de 2000 53

2.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA 62

2.2.1 A Origem da Modelagem Paramétrica 62
2.2.2 Definição e Características 64
2.2.2.1 Definição de Nível 1: rudimentar 65
2.2.2.2 Definição de Nível 2: superficial 66
2.2.2.3 Definição de Nível 3: básica 69
2.2.2.4 Extrapolando Novas Funcionalidades à Definição Básica 71
2.2.2.5 Definição Adotada na Pesquisa 77
2.2.3 Vantagens e Limitações 77

2.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS 79

3 AS FORMAS CURVAS E A MODELAGEM GEOMÉTRICA 80

3.1 AS DIFERENTES GEOMETRIAS PARA AS FORMAS CURVAS 81

3.1.1 Da antiguidade ao século XVII 81
3.1.2 O Cálculo Infinitesimal e a Geometria Diferencial 83
3.1.3 As Geometrias não-Euclidianas 87
3.1.4 As classes de geometria de Felix Klein 89
3.1.5 Fractal 89
3.1.6 Topologia 92
3.1.7 Superfícies Curvilíneas 94

3.2 LINHAS E SUPERFÍCIES CURVAS NA MODELAGEM GEOMÉTRICA 97

3.2.1 Métodos Matemáticos para Definição de Superfícies 98
3.2.1.1 Definição de Curvas 98
3.2.1.1.1 Formas Não Paramétricas 100
3.2.1.1.2 Formas Paramétricas 101
3.2.1.2 Definição de Superfícies 112
3.2.2 Métodos de Modelagem para Geração e Transformação de Superfícies 115
3.2.2.1 Métodos de Criação de Superfícies 115
3.2.2.1.1 Primitivas Geométricas 115
3.2.2.1.2 Formas Livres 116
3.2.2.1.3 Secções Transversais 117
3.2.2.1.4 Varredura 117
3.2.2.2 Métodos de Transformação de Superfícies 120
3.2.2.2.1 Transformações Geométricas 120
3.2.2.2.2 Transformações de Combinação 122
3.2.2.2.3 Técnicas de Modelagem Avançadas 125

3.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS 129

4 PROCESSO DE SELEÇÃO DE OBRAS ARQUITETÔNICAS CURVILÍNEAS 130

4.1 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS EDIFÍCIOS 130

4.1.1 Levantamento inicial 131

4.1.2 Refinamento da seleção 132
4.2 UMA VISÃO PANORÂMICA DOS EDIFÍCIOS CURVILÍNEOS DA ARQUITETURA CONTEMPORÂNEA 136
4.2.1 Nationale-Nederlanden Building 136
4.2.2 Pavilhão FreshH2Oexpo 138
4.2.3 Museu Guggenheim de Bilbao 140
4.2.4 Centro de Mídia Natwest 143
4.2.5 Bubble BMW Pavilion 144
4.2.6 Sala de conferências do Banco DZ 146
4.2.7 Quadracci Pavilion 149
4.2.8 Eden Project 150
4.2.9 Prefeitura de Londres 153
4.2.10 Complexo Esplanade 156
4.2.11 Loja Selfridges de Birmingham 159
4.2.12 Museu Kunsthaus de Graz 162
4.2.13 Walt Disney Concert Hall 164
4.2.14 Auditório de Tenerife 167
4.2.15 30 St. Mary Axe 169
4.2.16 Centro musical Sage de Gateshead 172
4.2.17 Torre Agbar 176
4.2.18 HSB Turning Torso 179
4.2.19 Estádio Allianz Arena 181
4.2.20 Loja Peek & Cloppenburg de Colônia 183
4.3 OBRAS SELECIONADAS PARA ESTUDO EMPÍRICO 185
5 OS ESTUDOS EMPÍRICOS DE MODELAGEM PARAMÉTRICA 187
5.1 FERRAMENTA USADA NO ESTUDO EMPÍRICO 188
5.1.1 Plug-in Grasshopper 188
5.1.2 Abordagem algorítmica de modelagem 189
5.1.3 Gama de componentes do Grasshopper 194
5.1.3.1 Funções Matemáticas e Funções Lógicas 195
5.1.3.2 Curva e Superfície 196
5.1.3.3 Mesh 197
5.1.3.4 Vetores 198
5.1.3.5 Interseções 198
5.1.3.6 Transformações 198
5.1.3.7 Operações de manipulação de dados 199
5.1.4 O Grasshopper como interface para Modelagem Paramétrica 199
5.2 ESTUDO EMPÍRICO 1: ALLIANZ ARENA 200
5.2.1 Levantamento de informações 201
5.2.2 Principais etapas da modelagem 201
5.2.3 Descrição da construção do modelo 203
5.2.4 Apresentação do modelo final 209
5.2.5 Aspectos da modelagem no Grasshopper 209
5.2.6 Variações paramétricas 210
5.3 ESTUDO EMPÍRICO 2: HSB TURNING TORSO 212
5.3.1 Levantamento de informações 212
5.3.2 Principais etapas da modelagem 213
5.3.3 Descrição da construção do modelo 216
5.3.4 Apresentação do modelo final 228
5.3.5 Aspectos da modelagem no Grasshopper 229
5.3.6 Variações paramétricas 235
5.4 ESTUDO EMPÍRICO 3: 30 ST. MARY AXE 237
5.4.1 Levantamento de informações 237
5.4.2 Principais etapas da modelagem 238
5.4.3 Descrição da construção do modelo 241
5.4.4 Apresentação do modelo final 251
5.4.5 Aspectos da modelagem no Grasshopper 252

5.4.6 Variações paramétricas 255
5.5 ANÁLISE GERAL DOS ESTUDOS EMPÍRICOS 259
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 262
6.1 Conclusões 262
6.2 Dificuldades 264
6.3 Recomendações 265
6.4 Desdobramentos 266
6.5 Observações de fechamento sobre a pesquisa 268

Referências 269

1 Introdução

O tema discutido no presente trabalho encontra-se na interseção entre diferentes campos do conhecimento, a saber, a Arquitetura, a Matemática e a Ciência da Computação. De modo a aproximar o leitor do contexto mais específico, apresenta-se, a seguir, uma visão geral da temática abordando áreas particulares a esses campos, como a concepção de formas curvilíneas na Arquitetura, a Geometria e as ferramentas computacionais aplicadas ao projeto.

1.1 Temática

Sabe-se que, em grande parte, a projetação arquitetônica é uma atividade criativa e uma elaboração mental[1], sendo muitas vezes peculiar a um determinado arquiteto, ou seja, podendo variar de profissional a profissional. Entretanto, no âmbito da *práxis* profissional, existe uma caracterização do processo projetual comumente aceita como a concepção, o desenvolvimento e a documentação de uma proposta para uma obra arquitetônica (SILVA, 1984).

Convencionalmente, conforme Silva (1984, p. 103-115), esse processo acontece em etapas com a progressão do grau de definição da proposta, começando pela determinação do partido, seguido do detalhamento dele e das prescrições para sua execução. Apesar de admitirem-se etapas intermediárias, a nomenclatura geralmente aceita aponta três etapas significativas, que são denominadas, em ordem crescente de complexidade e grau de detalhamento, de estudo preliminar (1), anteprojeto (2) e projeto executivo (3), fazendo relação às atividades apontadas na definição de processo projetual do parágrafo anterior.

Resumidamente, a primeira etapa caracteriza-se por representar o estágio inicial da proposta arquitetônica e por isso as decisões de projeto não estão firmadas, ainda existindo espaço para modificá-las. Mais especificamente, onde se dá início à análise programática, às primeiras explorações do campo da forma e à verificação mínima de sua compatibilidade com as restrições impostas pelo cliente, pelo sítio, pelos materiais e tecnologias construtivas ou legislação. Na segunda etapa seleciona-se uma proposta a ser desenvolvida e refinada com maior rigor em relação às exigências externas, possibilitando a clara compreensão da obra e sua consequente apresentação ao cliente. Na terceira etapa, a proposta aprovada é amplamente pormenorizada para conter todas as informações e detalhes necessários para a execução da obra, mediante documentação projetual por representação técnica.

[1] Deve-se lembrar que essa elaboração mental se utiliza de suporte técnico na viabilização da proposta arquitetônica, sendo um instrumento de registro e **desenvolvimento** da idéia do arquiteto.

De interesse dessa dissertação, a etapa de estudos preliminares trabalha com um grande número de condicionantes do projeto que muitas vezes não podem ser satisfeitas simultaneamente e por isso a proposta arquitetônica é alcançada mediante um processo de aproximações sucessivas. No qual, o projetista procura determinar, por tentativas e adaptação, a configuração que atende a maioria das solicitações. Essa configuração ou proposta, não só reflete esse ajuste aos condicionantes externos ao projeto, como também a intenção plástica do arquiteto (SILVA, 1984, p. 96-97).

Essa expressão plástica trata da forma[2] proposta para a obra arquitetônica, sendo que a decisão por determinada opção é embasada em vários aspectos subjetivos e objetivos. No primeiro, tem-se a expressão da linguagem arquitetônica apoiada em estilos[3] históricos ou individuais. Para ilustrar, pode-se citar estilos como o estilo gótico ou de arquitetos mundialmente conhecidos, como Oscar Niemeyer. No segundo, tem-se a configuração volumétrica da obra resultante de quesitos funcionais e construtivos, como por exemplo, tipologias baseadas em sistemas estruturais específicos (SILVA, 1984). Comumente, a aplicação desse repertório de critérios subjetivos e objetivos durante o processo de exploração das formas ocorre de modo tácito, mas não se deve confundí-lo com um método arbitrário.

O momento de exploração das formas, durante a etapa de estudos preliminares, foca em trabalhar a macrodefinição da forma da obra arquitetônica[4]. Em outras palavras, a "[...] morfologia geral do edifício projetado, o modo pelo qual ele se insere no espaço, traduzindo-se no envoltório material do espaço arquitetônico." (SILVA, 1984, p. 107). Por questões de esclarecimentos, deve-se apontar outros termos[5] utilizados para o mesmo fim, como forma geral, formato primário, superfície externa, massa volumétrica (CONSIGLIERI, 1995, p. 13) e estrutura formal (MAFUZ, 2004).

Nessa fase de concepção formal, assim como em cada uma das etapas pertencentes ao processo de projeto, o arquiteto utiliza-se de suporte técnico para elaborar sua proposta, que historicamente tem sido apoiado em diferentes técnicas de representação gráfica (RÊGO, 2000, p. 42). Especificamente para a concepção formal, a representação deve dar suporte

---

[2] A forma faz referência tanto às estruturas internas quanto ao contorno externo de um objeto e inclui um sentido de massa ou volume (CHING, 2010, p. 66).

[3] Estilo em arquitetura pode ser definido como a expressão da similaridade de características de formas edificadas e sua sintaxe referente a uma escola, cultura, região geográfica, período (por exemplo, o estilo clássico); e/ou ao modo específico de produzir de um determinado arquiteto (MAYER, 2003, p. 1).

[4] Nesse ponto se apresenta o método mais tradicional de processo de projeto definido por Mitchell (1990, p. 230-231) como *top-down* (do geral para o específico ou a parte). Deve-se lembrar que, também, há o método *bottom-up*, no qual o arquiteto parte do detalhe para a formulação geral do projeto.

[5] Qualquer um dos termos poderá ser usado durante a presente dissertação para transmitir esse significado.

cognitivo e ser um instrumento de registro e desenvolvimento da idéia do arquiteto. Com esse suporte pode-se realizar a análise e a experimentação das possibilidades da forma do objeto a ser criado, de modo a ajudar na visualização das relações espaciais, ou seja, o raciocínio espacial. Devido a isso e somando a necessidade da consequente construção, a linguagem gráfica utilizada para a percepção espacial é embasada, principalmente, nos conhecimentos da Geometria[6] (SOARES, 2006, p. 3). O que resulta na presença desse conhecimento nas diversas técnicas de representação gráfica, seja na sistematização de técnicas científicas como o desenho técnico e as perspectivas, seja na percepção espacial das formas nas técnicas artísticas, como croquis e esboços.

É importante destacar que o sistema de representação gráfica e conseqüentemente, os recursos geométricos utilizados nele, exercem influência no processo de concepção das formas arquitetônicas[7]. Essa interferência está diretamente relacionada com a dimensão e a variedade do repertório de formas, que podem ser concebidas e construídas (CARPO, 2011, p. 31). Conforme Flório (2005), técnicas tradicionais de representação gráfica, como Desenho Técnico em vistas ortográficas juntamente com as regras de modulação[8] dos elementos arquitetônicos, induziram um modo específico de pensar a concepção formal, no qual se privilegia formas regulares[9] e principalmente retilíneas, em detrimento das curvilíneas.

Um dos principais motivos acontece, uma vez que, essas projeções não representam de maneira exata e precisa as formas curvas, principalmente desfigurando seu contorno, o que diminui sua eficácia para estes casos. Isso se sucede por que essa técnica só permite que sejam representadas em verdadeira grandeza, as faces do objeto que estejam paralelas ao plano de projeção e para tanto as superfícies deveriam ser compostas de planos retilíneos e não serem curvas.

Na Figura 1, pode-se perceber como as projeções estão distorcidas em relação ao objeto que representam. Assim, pode-se notar que sua aplicação em formas curvas é dificultada (SOARES, 2007, p. 20).

---

[6] Para utilizar representação gráfica na construção, ela precisava adquirir confiabilidade científica, por isso baseou-se na Geometria, na fisiologia do olhar e na física óptica (SOARES, 2006, p. 3).

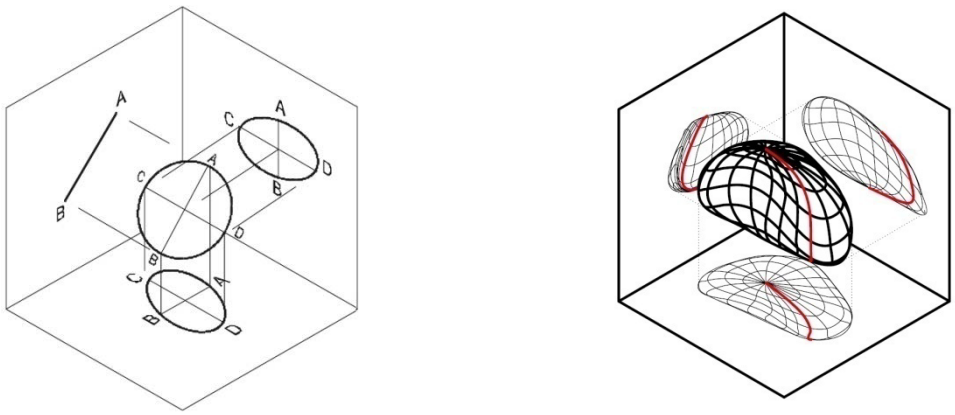
[7] Deve-se ressaltar que os métodos de representação não são os únicos a influenciarem a concepção formal de obras arquitetônicas, mas também os métodos construitivos possíveis de serem aplicados a elas.

[8] Construir a forma de uma obra arquitetônica adotando uma lógica de composição baseada em regras de proporção, ritmo e harmonia. Por exemplo, utilizando-se de malhas reguladoras, do *modulor* de Le corbusier, entre outros.

[9] Formas regulares são, neste trabalho, consideradas aquelas que podem ser construídas por retas e/ou arcos circulares. As formas curvilíneas irregulares são consideradas as de curvatura variável e não podem ser construídas pela junção de diferentes arcos circulares (Figura 1b).

Figura 1 – Dois exemplos da aplicação de vistas ortográficas em formas curvas

(a) (b)



Fonte: (a) IZIDORO; (b) SCHEURER; STEHLING, 2011.

Somado a isso, atualmente, essa técnica é a mais utilizada durante a fase de projeto executivo, o que resulta na transferência das suas limitações de representação, às alternativas formais possíveis de serem construídas. Tanto que Mitchell (2001, p. 354) aponta essa relação de restrição ao afirmar que os arquitetos "[...] costumam desenhar o que eles podem construir, e construir o que eles podem desenhar [...]". Mesmo que se aplicassem esses métodos de representação para estas formas curvas irregulares, o resultado seria uma execução manual de um grande número de projeções e rebatimentos para a total documentação desta forma, o que revela o esgotamento do seu potencial (SOARES, 2007, p. 20) e desestimula a construção de formas curvilíneas irregulares[10].

Por outro lado, as regras de proporção estabelecidas para linguagens arquitetônicas se apoiavam em técnicas de construção do Desenho Geométrico[11] que foram dominantes até o século XVII (FLORIO, 2005, p. 15), e que permitiam trabalhar com círculos e seus derivados, e raramente com alguma curva cônica ou as outras de grau superior a dois. Assim limitando as opções de formas curvas a serem utilizadas.

Apesar destas restrições das técnicas de representação, ao longo dos séculos, houveram arquitetos que procuraram trabalhar e construir formas curvas e irregulares, mas que eram casos raros até o século XX, no qual o interesse por estas formas na arquitetura multiplicou-

[10] Deve-se ressaltar que não se pretende afirmar que a utilização dessa representação específica impediu a construção de obras arquitetônicas com formas curvas, sejam elas simples e/ou irregulares. E nem que tenha sido o único motivo para essa situação, pois as limitações dos sistemas construtivos também realizaram um papel importante.

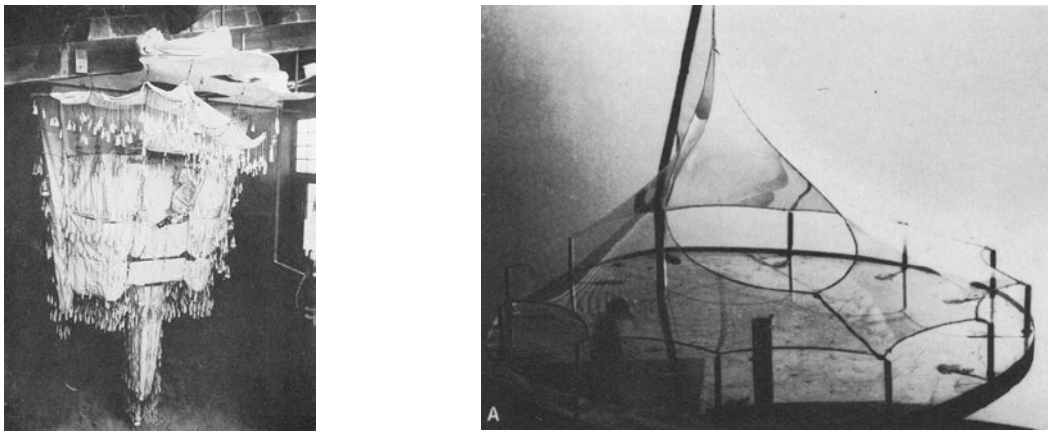
[11] Desenho Geométrico é uma área da Geometria que se propõe a representar e resolver graficamente problemas de natureza teórica e prática com o auxílio de instrumentos de desenho, como a régua e o compasso (PUTNOKI, 1993, p. 8).

se[12] (ROSA, 2003; KOLAREVIC, 2003, p. 6). Isso por que a partir do século XVIII até o final do século XX, novos conhecimentos sobre formas curvas foram desenvolvidos, que auxiliaram para uma projetação mais técnica e menos artesanal, em parte mediante estudos empíricos em modelos físicos, em parte utilizando-se novos recursos da Geometria. Mas também, a combinação de ambos os casos, uma vez que modelos físicos foram estudados para serem descritos matematicamente e vice-versa.

Carpo (2011, p. 31) relata que o primeiro caso parte da herança do arquiteto artesão que supervisionava o trabalho de construção da obra *in loco*, porém se tornou um campo de pesquisa científica na atualidade. Esse autor cita o trabalho de Antoni Gaudí, que usou modelos funiculares (Figura 2a) para definir a forma de alguns projetos, que matematicamente são definidos por curvas catenárias. Mas, também pode-se citar o trabalho de Frei Otto, no qual o arquiteto pesquisa soluções para estruturas tensionadas mediante modelos de físicos, por exemplo os de película de sabão (Figura 2b), os quais estão estreitamente relacionadas com o estudo de superfícies mínimas na Matemática.

Figura 2 – (a) Modelo funicular da Igreja da Colônia Güell de Antoni Gaudí; (b) modelo de um pavilhão em película de sabão para estudar superfícies mínimas criado por Frei Otto

(a) (b)



Fonte: (a) GIRALT-MIRACLE, 2002, p. 51; (b) ALMGREN, 1982, p. 169.

No segundo caso, são desenvolvidos novos estudos da Geometria sobre as formas curvas, principalmente a partir do século XVIII[13]. Muitos deles não podiam ser representados com as construções do desenho geométrico, mas alguns mediante modelos físicos, nos quais o conceito de geração de uma determinada forma era executado (SOARES, 2007, p. 20). Por exemplo, as superfícies regradas[14], que foram usadas por arquitetos como Antoni Gaudí, de

[12] Ver exemplos de obras construídas no Capítulo 4.
[13] Ver maiores detalhes no item 3.1.2, sobre Cálculo Infinitesimal e a Geometria Diferencial.
[14] Superfícies regradas podem ser obtidas pelo deslocamento contínuo e ordenado de uma reta no espaço, ver maiores detalhes no item 3.1.7.

modo a comunicar o método de construção de uma determinada forma para outros profissionais. Na Figura 3 se percebe a criação de uma forma hiperbólica através de uma geratriz, que neste caso é um molde com um recorte feito por retas, seu giro sobre eixo central para gerar a forma e a conferência de sua inclinação com uma reta.

Figura 3 – Criação de uma superfície regrada pela rotação de uma reta

Fonte: BURRY; BURRY, 2006, p. 439

Assim, por muitos anos a solução para a projetação e a comunicação de formas curvilíneas eram modelos físicos e não o desenho, o qual passou a contribuir para a informação de medidas gerais do objeto, retiradas das vistas ortográficas, para guiar a produção do modelo físico (SOARES, 2007, p. 20).

Por outro lado, ainda havia uma grande variedade de novos recursos da Geometria, os quais formam uma base teórica para a descrição mais precisa das superfícies curvas irregulares, que estavam fora do alcance de uso prático pelos arquitetos, pois esse conhecimento não era compatível com a representação por desenhos ou modelos físicos (SCHODEK et al., 2005, p. 47). Em meados do século XX, essa situação foi modificada pelo o advento do Projeto Auxiliado por Computador (*Computer Aided Design* - CAD) que trouxe esses novos conhecimentos de geometria codificados nas linguagens de programação através de técnicas de Modelagem Geométrica (HOWARD, 2006).

O CAD é a utilização de tecnologias computacionais no processo de projeto (BESANT; LUI, 1986). Como o projeto de arquitetura pode ser considerado um modelo[15] de um objeto a ser materializado (SILVA, 1984, p. 34), é possível afirmar que o foco do CAD é produzir um modelo do objeto arquitetônico. Logo, o CAD pode ser considerado uma modalidade de representação e um instrumento mediador do processo de projeto.

Especificamente, o CAD é uma das aplicações da tecnologia computacional que possibilita a representação visual de objetos, neste caso, é baseada na Computação Gráfica. Essa

[15] Modelo é uma certa modalidade de representação da realidade, através da manipulação de um reduzido número de variáveis mais significativas e da abstração daquelas que, para efeito de demonstração, podem ser negligenciadas (SILVA, 1984, p. 53).

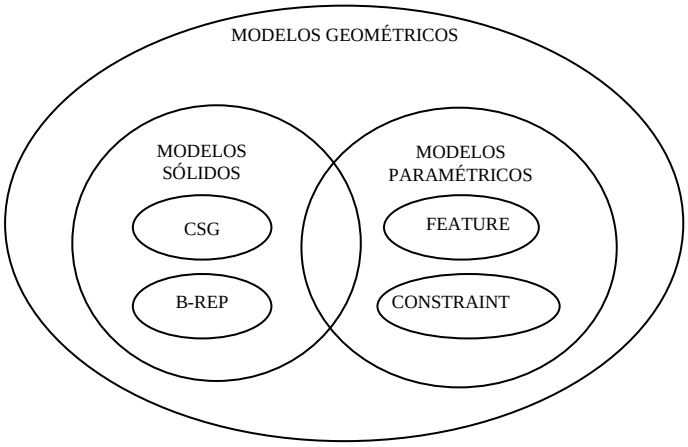
tecnologia é definida segundo a ISO *(International Organization for Standardization)* como "[...]um conjunto de ferramentas e técnicas para converter dados para ou de um dispositivo gráfico através do computador". Em outras palavras, é parte da Ciência da Computação que estuda algoritmos, técnicas e metodologia para a geração, manipulação, armazenamento e interpretação de imagens por meio de computadores.

De um modo simplificado este processo consiste de duas grandes etapas: visualização e modelagem. A primeira é o estudo dos processos de conversão das informações contidas na base de dados em imagem a ser apresentada em dispositivos gráficos de saída[16] (GOMES; VELHO, 1990, p. 77). Enquanto a segunda é o estudo dos métodos e das técnicas que permitam representar objetos reais ou não no computador, mediante modelos matemáticos, algoritmos e estruturas de dados (MORTENSON, 1997, p. 2). Assim, a representação é realizada por uma definição matemática, que simula determinadas características do objeto. A parte da Computação Gráfica, dentro da etapa de modelagem, que descreve a forma e as propriedades geométricas do modelo é a Modelagem Geométrica (MG), a qual se utiliza de diferentes disciplinas[17] da Matemática para essa função, mas, principalmente, a Geometria.

A MG é parte integrante dos programas CAD tridimensionais e responsável pelas ferramentas de manipulação das formas do modelo. Da mesma maneira que os outros métodos de representação descritos no presente item, a MG delimita o repertório das formas que podem ser concebidas, o qual depende dos métodos de representação empregados. Estes métodos têm evoluído e se aperfeiçoado de modo a ampliar essa gama de formas, mas ao mesmo tempo ampliando a precisão em suas definições. A Figura 4 apresenta os mais recentes métodos de representação para ferramentas CAD.

[16] Comumente os monitores e as impressoras.
[17] Algumas delas são a Geometria Diferencial, Álgebra Linear e Álgebra Booleana, a Topologia, os métodos numéricos, vetores, matrizes e Teoria dos Conjuntos (MORTENSON, 1997, p. 2).

Figura 4 – Os mais recentes métodos de representação de modelos geométricos utilizados em ferramentas CAD



Fonte: própria autora

Mas, de uma forma geral, esses métodos utilizam os conhecimentos sobre a Geometria formulados a partir do século XVII, como a Geometria Diferencial, para fundamentar as definições matemáticas dos modelos. Essa decisão tornou possível a especificação completa das superfícies por meio de equações matemáticas, ao contrário de outros sistemas de representação anteriores (FAUX; PRATT, 1979, p. 13) e, consequentemente, a manipulação mais precisa das formas irregulares, vencendo alguns obstáculos representativos (SCHODEK et al., 2005, p. 47). Além de criar uma variedade de ferramentas para concepção formal[18], que não são similares as ferramentas de desenho, dessa maneira ampliando as opções oferecidas ao projetista. Logo, essas ferramentas permitiram aos arquitetos explorar, conceber e manipular formas irregulares de uma maneira que eles não podiam fazer facilmente pelo método manual (LAWSON, 1999, p. 43).

Dentro desses novos métodos de representação está a Modelagem Paramétrica (MP), uma ferramenta que se apóia nos conhecimento de ambos os modelos anteriores: B-rep e CSG[19], e que foi criada no final dos anos 1980, quando houveram pesquisas para o desenvolvimento de ferramentas dedicadas para campos específicos das indústrias, como a eletrônica, a aeroespacial e a automotiva[20]. Essa ferramenta gerou novos recursos para otimizar os processos de concepção de formas e tornou-se foco de interesse de alguns pesquisadores e profissionais de Arquitetura, que imaginaram que esses novos recursos poderiam trazer benefícios para sua respectiva disciplina.

[18] Ver item 3.2.2, sobre Métodos de Modelagem para Geração e Transformação de Superfícies.
[19] Superfícies Limitantes (*Boundary Representation* - B-rep) e Geometria Sólida Construtiva (*Constructive Solid Geometry - CSG).*
[20] Ver maiores detalhes no Capítulo 2.

Devido a issso, nos últimos anos, a MP se tornou foco de diversas pesquisas em projeto auxiliado por computador para Arquitetura, principalmente na produção científica internacional, pois é uma ferramenta pouco explorada no Brasil. Nessas pesquisas há alguns discursos que afirmam que essa ferramenta é particularmente adequada para gerar e controlar formas complexas (BURRY; MURRAY, 1997), mas ainda não existem métodos de projeto corriqueiros, pois é um campo de investigação experimental.

Assim, a partir deste contexto apresentado, o presente trabalho pretende estudar os métodos e as estratégias que facilitem a atividade projetual na concepção de formas curvilíneas, ao enfocar na aplicabilidade da ferramenta de Modelagem Paramétrica pelo intermédio dos objetivos descritos no item seguir.

1.2 Objetivos

A presente pesquisa de mestrado tem como objetivo principal investigar a capacidade de modelagem de ferramentas computacionais que são baseadas em modelagem paramétrica, a fim de estabelecer sua contribuição para a elaboração de projetos arquitetônicos que possuam a forma principal curvilínea, considerando-se a fase de concepção do processo de projetação.

Seus objetivos específicos são:

1. Descrever as principais características e recursos da Modelagem Paramétrica em ambiente computacional;
2. Levantar as características centrais do estudo de linhas e superfícies curvilíneas na Geometria;
3. Construir um vocabulário de métodos de geração e transformação de formas na Geometria e na Modelagem Geométrica;
4. Analisar os procedimentos técnicos empregados pelos usuários na aplicação direta da Modelagem Paramétrica na concepção formal de projetos arquitetônicos através de estudos empíricos, e
5. Investigar como as variações paramétricas permitem explorar diferentes configurações geométricas entre os elementos do modelo de obra arquitetônica.

1.3 Abordagem Metodológica

Segundo a classificação proposta por Gil (1999, p. 43-44) esta pesquisa se enquadra como exploratória e tem como principais características:

a) Ser realizada especialmente quando o tema escolhido é pouco explorado e torna-se difícil formular sobre ele hipóteses precisas e operacionalizáveis;

b) Ter como finalidade principal desenvolver, esclarecer, modificar conceitos e idéias para a formulação de problemas mais precisos, ou hipóteses pesquisáveis para posteriores estudos;

c) Buscar uma visão geral, de tipo aproximativo, acerca de determinado fato ou contexto específico;

d) Ter como produto final do processo um problema mais esclarecido, passível de investigação mediante procedimentos mais sistematizados.

Em um primeiro momento (Capítulo 2 e 3), a pesquisa baseou-se em revisão bibliográfica de modo a estabelecer o seu contexto e informar sobre os embasamento teórico necessário para alcançar os objetivos específicios 1, 2 e 3. Neste caso, descrevendo a evolução das tecnologias do projeto auxiliado por computador e dos recursos da Geometria para estudo de formas curvas.

Em um segundo momento (Capítulo 4 e 5), a pesquisa utilizou-se de estudos empíricos ao modelar a “forma geral” de obras arquitetônicas. Para tanto, houve a seleção de vinte obras emblemáticas da arquitetura contemporânea, dos últimos vinte anos, a qual se apoiou em material editorial de autores referenciais. Essa seleção tornou-se repertório base do qual foram selecionadas três obras para os estudos empíricos, de modo a analisar qualitativamente os procedimentos técnicos de modelagem paramétrica.

1.4 Estrutura do Trabalho

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos conforme apresentados a seguir:

Capítulo 1, **Introdução**, aborda o contexto no qual o trabalho de mestrado está inserido, focando-se em três assuntos: concepção de formas curvilíneas na Arquitetura, Geometria e ferramentas computacionais aplicadas ao projeto. Também, apresenta a estrutura e os objetivos do trabalho.

Capítulo 2, **As Tecnologias do Projeto Auxiliado por Computador**, apresenta evolução das ferramentas computacionais aplicadas ao projeto, do seu surgimento até o período atual, destacando a presença dessas ferramentas no campo de Arquitetura e a capacidade de modelagem das mesmas. Ambos aspectos importantes para entender o suporte oferecido por essas ferramentas à concepção e ao desenvolvimento do projeto de formas não convencionais, mais especificamente as curvilíneas. Entre essas ferramentas, a Modelagem Paramétrica desempenhou um papel de destaque e por isso tornou-se foco do presente trabalho de mestrado, sendo apresentada em maior profundidade no final deste capítulo.

Capítulo 3, **As Formas Curvas e a Modelagem Geométrica**, expõe os conhecimentos da área de Geometria e da Computação Gráfica nos quais se apóiam o estudo, a definição e a manipulação de formas curvilíneas. No primeiro caso, mostra uma evolução cronológica do conjunto de teorias e de instrumentos do estudo das linhas e superfícies curvilíneas na Geometria. Enquanto no segundo caso, aponta como esse conhecimento matemático foi utilizado como ferramenta de representação de modelos idealizados de objetos do mundo físico, especialmente, em ambiente computacional, ao implementar essas definições matemáticas em ferramentas de Modelagem Geométrica.

Capítulo 4, **Processo de Seleção de Obras Arquitetônicas Curvilíneas**, constrói um repertório base para os estudos do Capítulo 5, por meio de um panorama aproximado e resumido das edificações de formas curvilíneas mais emblemáticas da arquitetura contemporânea, dos últimos vinte anos. Cada obra dessa coletânea tem a descrição de sua “forma geral” retratada do ponto de vista geométrico com o auxílio do vocabulário construído sobre os conhecimentos levantados no Capítulo 3.

Capítulo 5, **Os Estudos Empíricos de Modelagem Paramétrica**, apresenta a descrição do processo de modelagem paramétrica das três obras escolhidas do panorama da produção recente da arquitetura contemporânea. Explicam-se os procedimentos técnicos de modelagem, mediante imagens representativas de cada etapa e uma descrição apoiada no conjunto de conhecimentos adquirido da revisão bibliográfica (Capítulo 2 e 3).

Capítulo 6, **Considerações Finais**, apresenta considerações sobre os três estudos de modelagem das edificações realizados na pesquisa e indicações para realização de trabalhos posteriores que envolvam a extensão ou o aprofundamento de algumas questões relativas ao tema.

2 As Tecnologias do Projeto Auxiliado por Computador

A Era da Informação gerou impactos profundos na sociedade, na cultura e na economia, na qual o computador passou a desempenhar um papel único. Seus efeitos na Arquitetura são variados, mas principalmente associados à projetação (*Computer Aided Design* - CAD), que vem evoluindo desde o seu surgimento na década de 60. A origem e o desenvolvimento do CAD estão ligados a vários campos de conhecimento, como a Engenharia e a Ciência da Computação, a Teoria dos Sistemas, as Ciências Cognitivas, entre outros (CELANI, 2002, p. 25). Todas estas áreas, e várias outras, com as suas diferentes contribuições propiciará a evolução e o atual estágio de desenvolvimento das tecnologias CAD.

Nesse contexto, é importante levar em consideração as influências das diferentes áreas de conhecimento para entender como a tecnologia CAD evoluiu, e é empregada na Arquitetura. Para tanto, essas particularidades serão demonstradas por meio de um histórico da evolução do CAD, do seu surgimento até o período atual, divido em fases de dez anos, nas quais se destaca os acontecimentos predominantes da evolução, e em especial naquilo que diz respeito às suas capacidades de modelagem. Em seguida, foi feita uma explanação mais aprofundada sobre a Modelagem Paramétrica, foco do trabalho em questão.

2.1 A Evolução das tecnologias computacionais aplicadas ao projeto

Em primeiro lugar, deve-se esclarecer a conceituação de CAD, uma vez que o termo é usado de maneira inadequada para definir coisas diferentes e mesmo na bibliografia científica há divergências sobre certos aspectos dessa definição.

Em uma visão elementar, Coons (1963, p. 299) descreve o CAD como a técnica que reuni homem e computador utilizando-se os melhores recursos de cada parte no processo de projeto em geral. Por outro lado, Besant e Lui (1986) o define como o uso de tecnologias computacionais na criação, modificação, análise e otimização do processo de projeto. Mais especificamente, pode-se entender o CAD em três níveis, conforme Amorim (2010):

- Ferramentas CAD – conjuntos de programas específicos usados no desenvolvimento e representação de projetos;
- Tecnologias CAD – termo genérico que refere-se ao conjunto de recursos como programas (estrutura de dados, linguagens, esquema de representação, algoritmos, etc.) e dispositivos físicos, dos mais diversos, e metodologias empregadas;

- Sistemas CAD – considerado como o conjunto inter-relacionado de: programas diversos (*software*); equipamentos necessários (*hardware*); métodos, procedimentos e normas empregados na projetação (*orgware*); os próprios usuários do sistema (*peopleware*);

Para a realização do histórico da evolução do CAD foi focado na tecnologia, tendo como alvo a capacidade de modelagem (representação da forma ao longo do tempo).

2.1.1 A Origem da Tecnologia CAD

O surgimento de um evento ou de uma inovação em qualquer campo do conhecimento é geralmente creditado a um cenário propício, no qual se configuram as condições necessárias para seu princípio. No caso do CAD, sua origem aconteceu num cenário de articulação tecnológica que contribuiu para a formação de suas premissas básicas e possui elementos que, comumente, são confundidos com a própria definição do CAD. Assim, se torna importante o esclarecimento dos fatores que levaram ao seu surgimento, de modo a entender não somente o objetivo da criação do CAD como também seu desenvolvimento.

O cenário de origem do CAD está associado à automação industrial com o surgimento da "computação gráfica"[21] (CG). Sendo o primeiro parcialmente responsável pelo desenvolvimento do segundo, e ambos desenvolvidos na década de 50, principalmente, no Massachusetts Institute of Technology - MIT, (BESANT; LUI, 1986).

A automação industrial permitiu que produtos fossem produzidos automaticamente por máquinas de Controle Numérico (CN), para tanto as instruções de fabricação deveriam ser traduzidas em valores numéricos, "lidos e interpretados" pelas máquinas. Até os anos 50, essa atividade era realizada manualmente por um programador, gerando uma situação muito propensa a erros (BESANT; LUI, 1986, p. 15). Uma vez reconhecido que os computadores poderiam realizar tal trabalho de modo a, tanto evitar os erros de cálculos, quanto para agilizar esse processo, surgiu o interesse na criação de ferramentas computacionais para a especificação e edição de formas tridimensionais (MITCHELL, 2006, p. 1). Os primeiros programas CAD foram destinados, sobretudo, para essa tarefa.

Segundo Besant e Lui (1986, p. 19), o principal objetivo das versões iniciais do CAD era produzir uma definição do produto a ser fabricado na forma de um banco de dados

[21] Computação Gráfica é uma tradução inadequada do termo *computer graphics*, o mesmo deveria ser traduzido como "gráficos por computador" ou "gráficos gerados por computador". O professor Romero Tori da USP sugere um neologismo alternativo: "Compugrafia".

geométricos, ou um desenho derivado dessa base de dados, que estabelecesse a configuração física desse objeto. Desta forma, as primeiras aplicações de CAD realizavam principalmente cálculos matemáticos ou gerenciamento de dados, porém, tal atividade era executada com pouca visualização e interação gráfica com o computador (CELANI, 2002, p. 28), pois permanecia, em grande parte, sendo executada por meio de linguagem de programação textual inserida no computador através de teclado ou cartões perfurados (AYRES FILHO, 2009, p. 8). Essa situação se tornou limitante tanto das características do CAD, como para seu emprego nas áreas de projeto.

Essa barreira foi superada com o advento da "Computação Gráfica", uma tecnologia gerada na década de 50 pelo MIT que abrange tanto o *hardware*, quanto o *software*, necessários para a "criação e manipulação de imagens em um dispositivo de visualização com o auxílio do computador" (BESANT; LUI, 1986. p. 14). Em outras palavras, essa tecnologia consiste na conversão de dados geométricos em gráficos simples através do computador, para serem exibidos em dispositivos de saída gráfica, em destaque os monitores (AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 3).

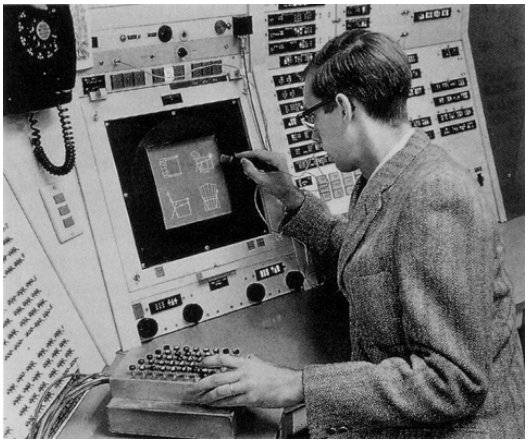
Nesse contexto, o principal aspecto abordado pela CG é o da comunicação visual entre homem e máquina, que permitiu uma nova maneira de interação entre ambas as partes, por meio da criação de uma interface que admite a entrada de dados gráficos, não somente numéricos ou textuais, por meio de um dispositivo apontador, que manipula e ativa imagens em um monitor. Assim, a CG melhorou a capacidade do usuário de compreender os dados e visualizar objetos a serem fabricados (FOLEY et al., 1990, p. 4), além de possibilitar um modo de entrada de dados ágil e intuitivo, pertinente ao processo de projeto.

Em segundo plano, a descrição e estruturação desses dados geométricos a serem implantados no computador se dão mediante a disciplina de Modelagem Geométrica, cujo desenvolvimento paralelo ao CAD é de grande importância, visto que influenciará no crescimento dessa disciplina.

Foi nesse cenário, descrito a cima, que surgiu o sistema gráfico considerado como o primeiro programa CAD: o SKETCHPAD, que foi criado por Ivan E. Sutherland, em sua tese de doutorado em 1963 no MIT – "SKETCHPAD: *a Man-Machine Graphical Communication System*". Esse sistema estabeleceu os pré-requisitos básicos para um sistema CAD: a interface gráfica para comunicação visual entre homem e máquina mediante dispositivos e/ou equipamentos de entrada e saída gráfica, e a representação visual do objeto através da

implementação em modelo geométrico. Além disso, desenvolveu técnicas interativas que possibilitavam o usuário a interagir com as formas na tela (Figura 5) através da utilização de um dispositivo chamado caneta óptica (*light-pen*) e um teclado simples com cerca de 40 botões que correspondiam a comandos como, por exemplo, *draw*, *move* ou *delete* (NATIVIDADE, 2010, p. 67). Esse tipo de sistema ficou conhecido como "*Interative Graphics*" e assim tornou possível se provar a viabilidade do uso de sistemas CAD para o desenho (*drafting*) e o projeto (*design*) (AMORIM, 1990).

Figura 5 – Sketchpad sendo usado



Fonte: KALAY, 2004, p. 66.

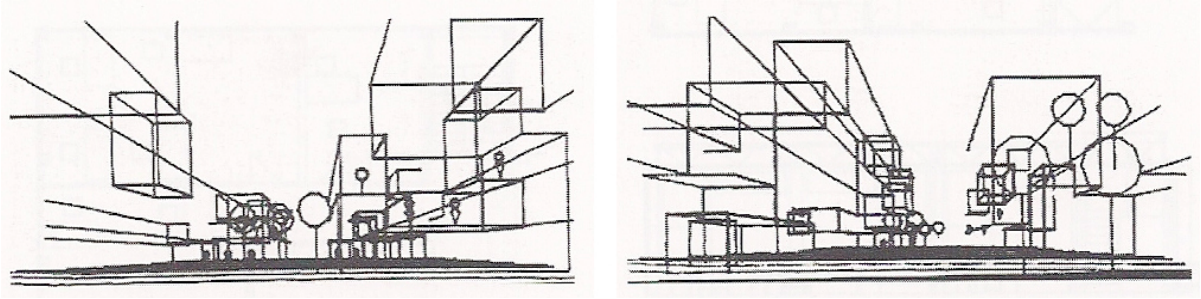
2.1.2 Década de 1960

Como visto no item 2.1.1, o surgimento do CAD se deu no meio acadêmico internacional, através de um cenário propício que apresentou várias tecnologias importantes e que foram articuladas por Ivan E. Sutherland, no sistema Sketchpad. Após a criação do CAD e ao longo da década de 1960, as pesquisas ganharam um grande impulso, tanto no campo acadêmico como nas indústrias, de modo a testar e avaliar em qual área específica e de que forma essa tecnologia poderia ser utilizada.

Entre os trabalhos acadêmicos, surgiu o interesse em utilizar computadores na área de arquitetura (KALAY, 2004, p. 67), que gerou diversas aplicações. Conforme Mitchell (1977, p. 16), como exemplos têm-se o sistema criado por William Newman (1966), no qual o usuário poderia desenvolver projetos através de uma biblioteca de elementos construtivos industrializados. Também, segundo mesmo autor, outros direcionados ao planejamento e urbanismo, como o URBAN5 (Figura 6) do Nicholas Negroponte e Groisser em 1968 e o COPLANNER de Souder e Clark, em 1964. Mais ainda, Negroponte defendia a não divisão

tradicional de tarefas entre máquina e usuário[22], apontando que o computador poderia extrapolar a barreia das questões quantificáveis (NATIVIDADE, 2010, p. 82-83). Assim, investigou possíveis interações homem-máquina e suas aplicações na Arquitetura através de uma abordagem usando a inteligência artificial (KALAY, 2004, p. 67), que dentre várias opções, tentava simular o comportamento humano usando computadores.

Figura 6 – URBAN5 do Nicholas Negroponte e Groisser, de 1968



Fonte: KALAY, 2004, p. 67.

Assim, durante essas pesquisas, a visão das capacidades do CAD ampliou-se, deixando de ser visto somente como uma ferramenta para auxiliar a fabricação automatizada de produtos, para ser visto como uma ferramenta em potencial para o auxílio ao projeto arquitetônico, mas, nesse momento, ainda não foram produzidas aplicações comerciais para a prática arquitetônica.

Paralelamente, foram realizadas pesquisas internas pelas grandes indústrias que tinham interesse no potencial de uso para fabricação de produto e que resultou no primeiro sistema CAD comercial: o DAC-1, *Design Augmented by Computer* (Figura 7), desenvolvido pela IBM para a General Motors, em 1964. O DAC-1 foi o precursor de outros programas CAD implementados na indústria automobilística e aeronáutica, até o final da década de 60 (MITCHELL, 1977, p. 15).

Figura 7 – "DAC-1" system (Design Augmented by Computers)

Fonte: CHAVARRO, 2011.

[22] No qual o computador possui boa habilidade de análise numérica e, portanto somente é adequado para funções quantificadoras, ver mais sobre o assunto em Besant e Lui (1986, p. 15-21).

Esse maior emprego pela indústria, na década de 1960, se deve ao alto valor desses programas e dos *mainframes* que os suportavam, sendo adotados apenas nas grandes indústrias, onde a sua utilização justificava os elevados custos de capital (BESANT; LUI, 1986, p. 14). É também por razões de ordem econômicas que a aplicação do CAD na Arquitetura não acontece nesse momento, visto que os escritórios de arquitetura possuíam um porte desproporcionalmente menor do que as indústrias, e a implementação de um sistema CAD naquele momento se encontrava além dos recursos de qualquer escritório, mesmo os maiores (MITCHELL, 1977, p. 15).

Além da questão financeira, os programas CAD se mantiveram afastados dos escritórios de Arquitetura devido a uma questão de implantação: a necessidade de operadores especializados para o desenvolvimento de *software* aplicativos que comumente eram feito pelas próprias empresas usuárias, até 1977, quando surgem os primeiros "pacotes" de *software* (AMORIM, 1990). As indústrias podiam arcar com os custos desse pessoal especializado e assim escreviam seus próprios programas.

2.1.3 Década de 1970

Essa situação se mantém durante a década de 1970, no qual se intensificam as pesquisas e o desenvolvimento do CAD divididos em duas frentes principais: modelagem geométrica e adaptação a conteúdos específicos, dentre eles a indústria da construção (BÉZIER, 1989, p. 261; KALAY, 2004, p. 67).

Pois enquanto na década de 60 desenvolveu-se o *Coons Patch* (1964), a curva *Hermite* ou *Fergunson* (1964) e a *Spline natural* (1967), na década de 70 tem-se o refinamento do tratamento das curvas com *Bézier* (1971) e *B-spline* (1974) ampliando o conhecimento de modelagem de superfície. Além disso, novos modelos de representações superaram a modelagem de superfície, com a criação da Modelagem por Sólidos (*Solid Modeling*), tendo os americanos Ian Braid proposto como linha de abordagem o modelo de Superfícies Limitantes (*Boundary Representation* ou B-rep), enquanto Ari Requicha e Herb Voelcker o da Geometria Sólida Construtiva (*Constructive Solid Geometry* ou CSG). Assim, foco da primeira frente, são às pesquisas dos algoritmos para descrição de formas geométricas (EASTMAN, 1999, p. 38), usufruindo das descrições matemática da forma para uso na Computação Gráfica (FARIN, 2002, p. XV), determinando uma área de pesquisa denominada de *Computer Aided Geometric Design* (CAGD), criada em 1974 por Barnhill e Riesenfeld.

Na segunda frente, o foco foi no desenvolvimento de sistemas para a indústria da construção que auxiliaria a todas as operações relacionadas com o edifício. Essa frente foi encabeçada por grupos de pesquisa de base universitária nos Estados Unidos e na Grã-Bretanha. Como exemplo tem-se o *Building Description System* (BDS) do professor Charles M. Eastman (1974) e o *Computer Aided Engineering and Architectural Design System* (CAEADS) de Harold Borkin (KALAY, 2004, p. 67).

Essa divisão em duas frentes começa a delinear as duas categorias gerais das ferramentas CAD, segundo Rêgo (2008, p. 77): dos programas genéricos e dos programas dedicados. A primeira categoria trata do desenvolvimento de programas gráficos, com algoritmos genéricos passíveis de aplicação em qualquer área e foi baseada no campo de CAGD, patrocinada pelas indústrias mecânica, automobilística e aeroespacial. A segunda categoria trata de programas que respondem diretamente às necessidades de áreas de conhecimento específicas e foi baseada na segunda frente de pesquisa, tendo sido patrocinada pela indústria da construção.

Paralelamente a essas duas frentes de pesquisa, novas ferramentas CAD comerciais foram implantados em mini-computadores que possuíam custo inferior a um *mainframe*, mas ainda somente ao alcance de empresas de grande porte. Além disso, eles podiam ser usados por até quatro operadores treinados ao mesmo tempo e assim justificar ainda mais o custo desses sistemas (EASTMAN, 1999, p. 38).

2.1.4 Década de 1980

A década de 1980 foi o período de aproximação dos sistemas CAD com varias áreas de projeto, dentre elas, a Arquitetura e propagação de seu uso. Até a metade dessa década, as ferramentas CAD eram desenvolvidas para supermini e minicomputadores (EASTMAN, 1999, p. 39), ainda necessitando de operadores especializados como na década de 70. Essa prática mudou com a noção do computador pessoal (*personal computer* – PC) lançado pela IBM, em 1981, e a Apple, em 1984. Ambas plataformas se tornaram possível com o surgimento dos microprocessadores e da indústria de *software*, que produzia os pacotes de aplicativos.

Ainda na década de 80, houve a popularização desses computadores pessoais com a queda de preços do *hardware* propiciada pelo avanço da microeletrônica que trouxe a crescente miniaturização dos equipamentos eletrônicos (AMORIM, 1990). Esses computadores pessoais utilizavam os “pacotes de *software*” que não exigiam grandes conhecimentos de

programação e nem a contratação de especialistas para desenvolver seus programas. Principalmente, o microcomputador da Apple (Figura 8) que apresentou uma interface mais amigável com o uso de ícones, de janelas e de *mouse* (MITCHELL, 1990, p. 482), diferentemente dos primeiros microcomputadores, que possuíam uma interface baseada em texto.

Figura 8 – Computador Macintosh da Apple em 1984

Fonte: NATIVIDADE, 2010, p. 101.

Devido a combinação desses fatores, houve uma grande aceitação desses microcomputadores dentro de pequenas empresas, como as de arquitetura, criando "[...] pela primeira vez, a possibilidade de um mercado em massa para sistemas CAD.” (MITCHELL, 1990, p. 482). Isso gerou uma demanda por novas ferramentas CAD adaptadas a esses PC, visto que não havia programas CAD compatíveis com esses microcomputadores, pois as ferramentas CAD usados nos *mainframes* e minicomputadores eram extensos e complexos de mais para a capacidade de processamento dos PC (EASTMAN, 1999, p. 39).

Então, para atender essa demanda e ao mesmo tempo se adequar ao um nível de processamento diferente, os primeiros programas CAD desenvolvidos para PC sofreram uma simplificação, se tornando genéricos editores de desenhos ou os *draft systems*. Eram baseados nos mesmos princípios do *Sketchpad* (NATIVIDADE, 2010, p. 102), e não traziam recursos específicos de qualquer área de conhecimento, como a Arquitetura, por exemplo.

Algumas justificativas são apresentadas para essa atitude. Uma visão defende que as necessidades dos profissionais de projeto, vistas de fora da profissão, consistiam principalmente de desenho ou, no máximo, aplicações de modelagem (KALAY, 2004, p. 69). Outra visão, afirma que “[...] a nascente indústria de *software* passou a se concentrar no aspecto que podia ser mais facilmente resolvido – a criação de desenhos no computador.”

(AYRES FILHO, 2009, p. 9). Por último, o mercado de pequenas empresas, como o de Arquitetura, era insuficiente para sustentar os custos de desenvolvimento associados aos grandes pacotes de programas dedicados e por isso as *sofhouse* buscaram uma resposta única a todos esses diferentes campos mediante o desenvolvimento de programas genéricos (LAWSON, 1999, p. 32).

Mesmo como programas genéricos, houve do final da década de 1980 para o começo da década de 1990, a difusão desses programas CAD em escritórios de arquitetura de diferentes portes em diversas partes do mundo (KALAY, 2004, p. 68). Eram, principalmente, editores de desenho que ofereciam um modo de produção diferente dos desenhos manuais executados em pranchetas, pois esses programas CAD possuíam operações de compor, combinar e transformar elementos gráficos presente nas telas que eram muitos dificeis de executar manualmente (LAWSON, 1998, p. 49).

Essa diferença foi percebida por Sutherland (2003), que afirmou que as propriedades do desenho no computador eram diferentes do desenho à mão, não só por conta da precisão e facilidade do traço, rapidez para apagar linhas, mas principalmente pela habilidade de mover partes do desenho no computador sem precisar apagá-las, operação inexistente no desenho manual. Essas novas características acabaram por libertar o desenhista do rigor e precisão exigidos em desenhos manuais, como os executados em nanquim, tornando assim, o processo mais rápido, pois diminuíram o redesenho de pranchas inteiras. Ambos os casos oferecendo a perspectiva de melhorar o controle de qualidade dos desenhos de documentação (LAWSON, 1998, p. 49).

O crescimento contínuo da capacidade de processamento dos microcomputadores, no final da década de 80, a resolução cada vez maior de telas de computador coloridas (VGA), e o advento da impressão a jato de tinta, tornaram possível a introdução de ferramentas de modelagem geométrica tridimensional acessíveis aos escritórios de arquiteutra (CELANI, 2002, p. 34; KALAY, 2004, p. 69-70). A capacidade de representar formas tridimensionais existia desde a criação do CAD, mas durante esses vinte anos eram de exclusividade de *mainframes* e *workstations*[23], consequentemente, estavam fora do alcance da maioria dos arquitetos.

Essa nova situação permitiu um uso diferente do CAD, além do editor de desenho, mas como alternativa a maquete, e dessa maneira, funcionou como uma ferramenta de visualização da

[23] Minicomputadores com sistemas operacionais Unix (EASTMAN, 1999, p. 39).

proposta arquitetônica (EASTMAN, 1989, p. 10). Principalmente com os avanços em técnicas de *rendering*, como *ray tracing*[24] e *radiosity lighting*[25]. A combinação de ambos permitiu produzir representações em perspectiva (em imagem *raster*) a partir de um modelo geométrico, que continha a texturização dessas imagens, ou seja, simulação dos efeitos de luz e sombra, reflexos, texturas e transparências dos materiais. Essas imagens sintéticas foram usadas como documentos de apresentação de projeto para comunicação com clientes, que agora poderiam ser realizadas através de projeção de imagens, ao invés de um conjunto de pranchas (MITCHELL; MCCULLOUGH, 1991, p. 401).

Deve-se destacar que essa capacidade de modelagem geométrica tridimensional, abriu caminho para a possibilidade de mediação do computador na fase de estudos preliminares (RÊGO, 2000, p. 85) mediante estudos volumétricos. Principalmente no caso de formas mais complexas, no qual as projeções ortogonais são limitadas para explicar e estudar esse formato, assim necessitando de um número maior de vistas (MITCHELL; MCCULLOUGH, 1991, p. 401).

Nesse momento, final da década de 1980, a modelagem geométrica tridimensional não teve um impacto significativo no campo profissional da Arquitetura (EASTMAN, 1989, p. 10). Mesmo com esses últimos avanços, geralmente o computador somente era usado no final do processo de projeto, quando as soluções já haviam sido definidas, funcionando como um recurso de representação e visualização. Assim, apesar dessas novas ferramentas abrirem a oportunidade para sua aplicação nas fases preliminares da projetação, o interesse foi ainda restrito. Na verdade, as ferramentas CAD genéricas para computadores pessoais não tinham por objetivo auxiliar os arquitetos a partir dos estágios conceituais do projeto. Tais aplicações especializadas permaneceram limitadas à pesquisa acadêmica, enquanto a grande maioria dos escritórios manteve seu uso restrito ao desenho técnico e à apresentação final de projetos (CELANI, 2002, p. 35).

Foi nesse contexto que houve a consolidação da presença de ferramentas CAD no campo da Arquitetura (EASTMAN, 1999, p. 39), nos países desenvolvidos, com a informatização dos escritórios de arquitetura com a substituição gradual das pranchetas e seus instrumentos de

---

[24]*Raytracing* é um algoritmo de *rendering* (texturização) desenvolvido por Turner Whitted em 1980. O algoritmo é utilizado no cálculo dos atributos de iluminação dos ambientes virtuais, simulando o caminho percorrido pelos raios da fonte luminosa cujos parâmetros, como intensidade e temperatura de cor são estipulados pelo *designer* (NATIVIDADE, 2010, p. 103).

[25]*Radiosity lighting* (iluminação por Radiosidade): técnica de cálculo da iluminação global de um ambiente virtual, que consiste em decompor as superfícies em elementos poligonais para facilitar o cálculo da troca de energia entre todos os elementos (GOMES; VELHO, 2008, p. 553).

desenho por ferramentas computacionais como os editores de desenho e modeladores geométricos, que ficou conhecido como "prancheta eletrônica" (RÊGO, 2008, p. 82). De fato, isso não significou a modificação de um paradigma projetual da arquitetura, pois houve a "[...] transferência de procedimentos adotados na prancheta para os editores de desenho, acarretando a subutilização do instrumento gráfico digital [...]" (RÊGO, 2008, p. 113).

Além disso, houve a inserção da informática no programa de formação das escolas de Arquitetura em meados dos anos 80 fora do país[26]. Também com o aumento do interesse da comunidade acadêmica demonstrado pelo surgimento e proliferação de conferências, *workshops*, revistas especializadas no assunto e as primeiras associações de âmbito continental, como a ACADIA e eCAADe, no início dos anos 80 (RÊGO, 2000, p. 131).

Simultaneamente à difusão dos programas CAD genéricos na Arquitetura, de acordo com Kalay (2004, p. 71-72), outras disciplinas, nomeadamente a indústria eletrônica, foram focando em produzir *software* de CAD dedicados cada vez mais "inteligentes". A partir de pesquisas, tanto acadêmicas quanto corporativas, buscava-se representar o objeto a ser produzido e não um desenho dele. Para tanto, essas ferramentas devem definir atributos de comportamento, os quais sejam geométricos ou não, aos elementos do modelo geométrico. Deste modo, fazendo simples elementos geométricos como retângulos, serem tratados pelo computador como, por exemplo, transistores, capacitores e resistores. Logo, essas pesquisas deram início ao estabelecimento de níveis de semântica para ferramentas CAD[27], que será comentada em maiores detalhes no item 2.2.2.4.

Pode-se destacar duas tecnologias: orientação a objeto na criação de modelos de dados (AYRES FILHO, 2009, p. 23) e a Modelagem Paramétrica (será discutida no item 2.2). Ambas apareceram no final da década de 1980 e terão um papel importante no desenvolvimento do CAD nas próximas duas décadas. Esse desenvolvimento foi acompanhado por alguns pesquisadores e profissionais de arquitetura, que perceberam que esses novos recursos provaram trazer benefícios para suas respectivas disciplinas, auxiliando significativamente no processo de projeto.

Com essa constatação, foi possível conseguir novo respaldo para reforçar antigas pesquisas da década de 70 sobre programas dedicados para a indústria da construção (KALAY, 2004, p.

---

[26] No Brasil a inserção da informática no programa de formação das escolas de arquitetura começou a ser obrigatória com Portaria MEC 1770/94, mas antes desse ano já haviam algumas iniciativas acadêmicas, entre elas, cursos de extensão na Universidade de São Paulo em 1987 e a criação de laboratórios de informática aplicada como o LCAD na UFBA em 1992 (AMORIM, 1997, p. 57).

[27] Em maiores detalhes no item 2.2.2.4, do capítulo sobre Modelagem Paramétrica.

72). Também incentivou novas pesquisas acadêmicas a estudar a aplicação dos novos recursos, em caráter exploratório e experimental, de modo a expandir as aplicações do CAD na Arquitetura, fora a de editor de desenho e modelador geométrico (MITCHELL, 2006, p. 3). Essas pesquisas terão implicações na prática arquitetônica na década de 1990.

Em um resultado mais próximo, essa situação estimulou a procura de maneiras de melhorar as capacidades das ferramentas genéricas por profissionais de arquitetura, que descobriram que esses programas possuíam uma interface de personalização (*customization*) mediante um suporte a programação (*end-user programming*). Segundo Montagu (apud ROCHA, 2009, p. 26), esse suporte foi criado em 1985, para que pequenos desenvolvedores de software criassem aplicações específicas para cada área.

Nesse procedimento, chamado de *variant programming*, o usuário ou programador criava uma rotina ou roteiro (*script*[28]) que continha uma sequência de passos de tarefas repetitivas ou procedimentos simples que podiam ser usados para construir um objeto (HERNANDEZ, 2006b, p. 52). Esse roteiro era escrito em uma linguagem de programação e podia variar de tamanho e complexidade, indo de macros à rotinas e até mesmo pequenos programas (*plug-in*[29]) (MONEDERO, 2000, p. 373). A vantagem desse processo era que permitia a produção de *templates* (meta-moledos)[30] de objetos que podiam ser reutilizados durante o projeto. Especificamente, a automação da representação de escadas, telhados e outros elementos arquitetônicos, por meio da entrada de parâmetros, sem que o usuário tenha que literalmente desenhar ou modelar cada componente. Uma vez que o usuário dava entrada nesses dados, a representação da escada é gerada em 2D, ou em 3D, dependo do objetivo da "rotina". Dessa maneira, esse procedimento otimizava o conhecimento arquitetônico, pela inserção de princípios gerais de construção e de convenções da arquitetura nos programas CAD (MITCHELL; MCCULLOUGH, 1991, p. 405; EASTMAN, 1999, p. 46).

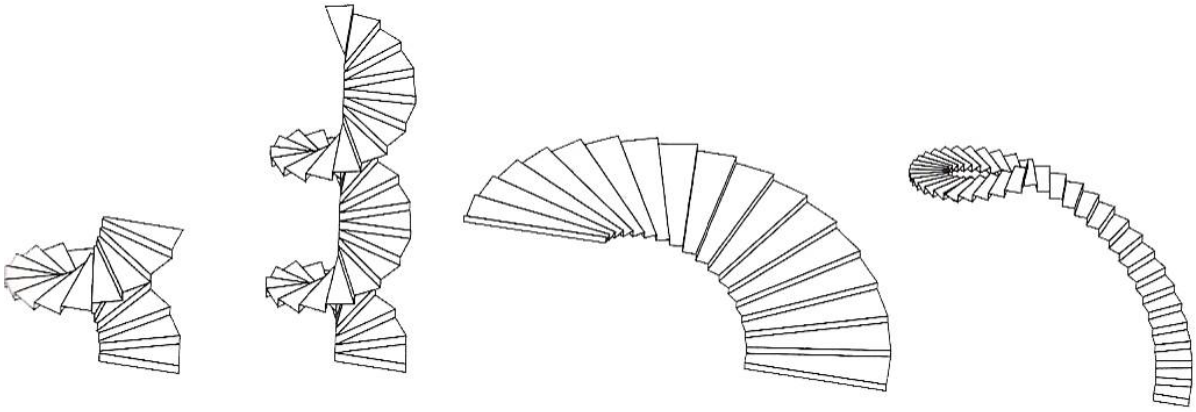
---

[28] *Script* é um modo de representação, de médio nível de abstração, para dar instruções ou comandos a serem realizados por um computador. Mais especificamente, é um roteiro que contém uma sequência de passos que orientam a realização de um conjunto de instruções. Geralmente, esse roteiro é representado por uma interface em forma de texto, mediante uso de linhas de comando, diferentemente do uso de representações gráficas como ícones - a saber, *graphical user interface* (GUI) - modo de comandar sistemas operacionais mais comum atualmente (HENDERSON, 2009).

[29] *Plug-in* é um pequeno programa que usa os recursos de um programa maior e normalmente oferece personalização ou recursos adicionais (HENDERSON, 2009, p. 374), e, por isso, somente funcionando sob o ambiente deles.

[30] Ver maiores detalhes no item 2.2.2.1, sobre formas rudimentares da modelagem paramétrica.

Figura 9 – Exemplos de variações alcançadas com a criação automatizada



Fonte: MITCHELL, MCCULLOUGH; 1991, p. 347.

No exemplo da Figura 9, alguns dos parâmetros para a concepção de uma escada podem ser: altura do pé direito, raio interno e externo, posição do primeiro e último degrau, e largura da escada.

Embora essa opção de adaptação das ferramentas genéricas não tivessem um impacto disseminado em todo o campo profissional da Arquitetura, viabilizaram as primeiras versões customizadas de programas como o AutoCAD da Autodesk, se usando de linguagem de programação LISP, dentre outras (MITCHELL; MCCULLOUGH, 1991, p. 348). No Brasil, foi bem aceito e difundido o Arqui3D, um *plug-in* desenvolvido pelo arquiteto Geraldo Brodbeck, desde 1983, para o AutoCAD e comercializado sua primeira versão pela Grapho em 1992.

2.1.5 Década de 1990

Durante a década de 1990, continuou o crescimento da capacidade de processamento dos microcomputadores, a partir do surgimento do processador *Pentium*, dando suporte a montagem de microcomputadores de melhor desempenho. Esses novos microcomputadores possibilitaram, não só elevar a complexidade dos programas CAD, de modo a retornar com as capacidades perdidas na época de sua simplificação e adaptação dos *mainframes* para os microcomputadores, como também, acelerar o processo de modelagem ao diminuir o intervalo de tempo entre o comando do usuário e a sua execução pelo computador (EASTMAN, 1999, p. 39).

Com esse suporte houve a expansão, tanto das empresas desenvolvedoras dos programas, quanto do mercado de CAD (EASTMAN, 1999, p. 39), que investiram na ampliação do desenvolvimento de programas CAD dedicados, em continuidade ao acontecido com outras

disciplinas no final da década de 1980. Mais ainda, a partir da experiência de personalização das ferramentas genéricas, descritas no item 2.1.4, percebeu-se que para tornar os recursos criados efetivamente de um domínio específico, seria necessário usar um tipo diferente de representação e de estrutura de dados utilizados pelos programas CAD genéricos, por isso, criou-se novos programas dedicados (EASTMAN, 1999, p. 41).

Conforme Celani (2002, p. 35), esses novos programas dedicados possuíam diferentes níveis de complexidade e capacidades, bem como, diferentes preços e atendiam as fases específicas do projeto e de suas atividades projetuais (concepção, desenvolvimento e avaliação). Na mesma época, surgiram novos programas para diferentes áreas como: Geografia, cartografia, geologia e planejamento urbano (com os sistemas de informação geográfica - SIG), produção cinematográfica (com a animação computadorizada), entre outros. Assim, a gama de opções de programas se ampliou, não só para a Arquitetura, mas como um todo, sendo que cada uma dessas ferramentas forneciam algum recurso específico proveniente de seu campo de conhecimento ou atividade a ser executada.

Atentos a esse crescimento desde o final dos anos 80[31], alguns arquitetos enxergaram o potencial de aplicação desses novos programas, provenientes de outras áreas, na Arquitetura e realizaram pesquisas para determinar se essas ferramentas e seus recursos poderiam ser adaptados ao processo projetual arquitetônico que, por fim, resultou na entrada de ferramentas de outras disciplinas no campo da Arquitetura (KOLAREVIC, 2003, p. 3). Desses experimentos, dos quais alguns serão explicitados a seguir, iniciou-se as explorações de potenciais ferramentas a serem utilizadas na área de AEC.

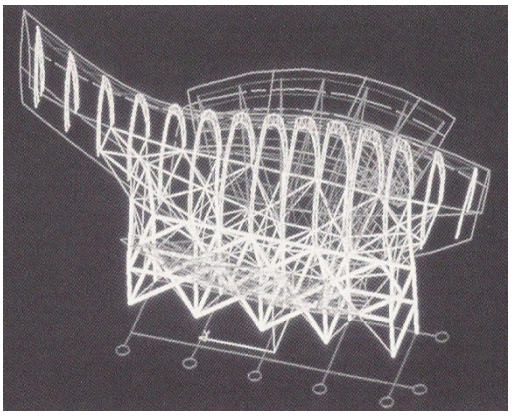
Mitchell (2006, p. 3) relata que entre os primeiros a examinar essas possibilidades está o escritório do arquiteto Frank Gehry que começou por testar ferramentas de outras disciplinas em seus projetos de formas complexas. Tais formas não podiam ser construídas com elementos construtivos industrializados e padronizados. Para essa situação, o objetivo do programa CAD era dar apoio à concepção e o desenvolvimento do projeto de formas não convencionais, ao mesmo tempo resolvendo a viabilidade construtiva.

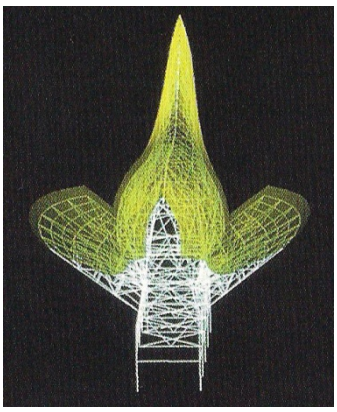
Essa busca por uma ferramenta CAD para formas não convencionais, segundo Jencks (2002, p. 250), é oriundo da pesquisa contínua desse escritório em métodos para construir o seu vocabulário formal próprio. Esse repertório formal foi desenvolvido mediante sucessivos estudos de formas curvas ao longo de uma série de projetos, como a Escultura do Peixe

[31] Ver item 2.1.4

(Figura 10) para Vila Olímpica em Barcelona (1992) e o Nationale-Nederlanden Building em Praga (1996), ambos sendo as primeiras obras construídas a se aplicar as novas ferramentas CAD.

Figura 10 – Modelo geométrico da escultura do peixe no CATIA





Fonte: LINDSEY, 2001, p. 34-36.

Como o novo programa deveria atender a viabilidade construtiva de formas curvas, de acordo com Lindsey (2001, p. 35), o escritório descobriu nas indústrias aeroespacial e automotiva o desenvolvimento de ferramenta compatível com esses critérios: o CATIA da Dassault Systemes. Esse programa possibilitava a definição das formas modeladas por equações paramétricas[32] e, devido a essa caracterítica, as representações de superfície poderiam ser usadas para orientar a fabricação de componentes de chapa metálica com grande precisão, utilizando máquinas de comando numérico que foram desenvolvidas em paralelo com CAD (EASTMAN, 1999, p. 42), à exemplo do realizado nessas indústrias.

Deve-se destacar que o CATIA pode ser enquadrado como resultado de pesquisas coorporativas realizadas desde a década de 1970 na frente de modelagem geométrica (apontada no item 2.1.3), tendo no final da década de 1980, desenvolvido programas comerciais com recursos que facilitaram um maior controle matemático das representações, transformações e análises de geometrias complexas, como por exemplo, as superfícies *Non Uniform Rational Basis Spline* (NURBS - 1987)[33] e a Modelagem Paramétrica. Assim, a partir da aplicação dessa ferramenta nos projetos descritos a cima, o escritório passou a usar o modelo geométrico como modo de representação de projetos, pois julgou ser o método apropriado para comunicação com as construtoras. Devido ao bom resultado, removeu-se a barreira que dificultava o escritório de propor formas cada vez mais complexas, como as usadas no Museu Guggenheim de Bilbao (LINDSEY, 2001, p. 38-39).

[32] Ver Superfícies Paramétricas no item 3.2.
[33] Ver item 3.2.1.1.2.4 sobre NURBS.

Foram essas experiências, e de outros arquitetos como Peter Eisenman (JENCKS, 2002, p. 211), que criaram um incentivo para pesquisas de caráter experimental da aplicação de ferramentas de outras áreas do conhecimento na Arquitetura (MITCHELL, 2006, p. 3), das quais se deve destacar os programas e as técnicas de modelagem para a Animação Computadorizada.

Apesar de ter surgido décadas antes, foi a parir dos anos 90 que houve um grande uso da tecnologia de animação computadorizada[34], principalmente a tridimensional. Isso foi resultado da combinação de vários avanços na informática e *Computer Aided Geometric Design* (CAGD)[35], como o surgimento de *hardware* específico[36] (PARENT, 2008, p. 24) e o refinamento contínuo das capacidades de seus programas com a incorporação de superfícies paramétricas. O marco desse crescimento é a criação de filmes inteiramente concebidos em ambiente computacional, à exemplo do *Toy Story* da Pixar em 1995 (PARENT, 2008, p. 28).

A primeira aplicação desses programas na arquitetura foi direcionada a criação de vídeos que simulavam a visão do usuário ao caminhar pelo edifício, que foi comumente chamada de *Tour Virtual*[37]. Entretanto, Foley e colaboradores (1990, p. 1057) reforçam que foi a aplicação de técnicas de animação para a visualização de fenômenos científicos[38] que tornou essa técnica relevante, pois junto com descobertas no campo da Inteligência Artificial[39], sistemas auto-reguladores, teorias evolucionárias e das técnicas de modelagem procedural[40], entre outros (KALAY, 2004, p. 73), proporcionaram a criação de programas de simulação.

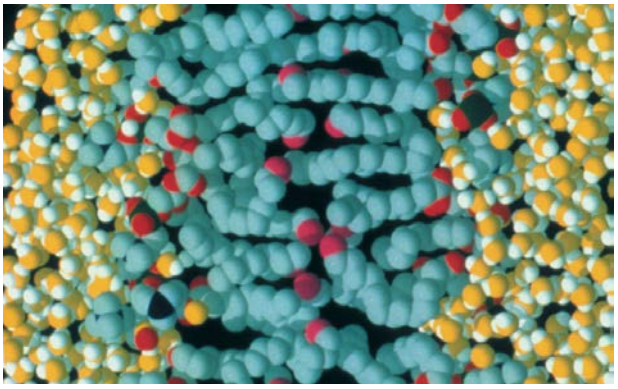
Esses programas possuem a capacidade de simular, ou seja, " [...] criar situações de semelhança a condições reais de posicionamento, comportamento, funcionamento, etc." (RÊGO, 2008, p. 76) dos fenômenos científicos (Figura 11), como reações químicas ou o crescimento de organismos vivos, de modo a realizar análises e estudos sobre eles. O

---

[34] Modelagem em ambiente computacional das alterações de posição e de atributos dos objetos ao longo do tempo, de modo a criar a ilusão de movimento (FOLEY et al., 1990, p. 1051).
[35] Ver item 2.1.3.
[36] Esses equipamentos possuíam algoritmos e linguagens de animação inseridos no próprio *hardware* (*firmware*), um exemplo desse equipamento foi o *Z-buffer* produzido no começo dos anos 80 (PARENT, 2008).
[37] A expressão "*tour virtual*" foi utilizada pela primeira vez na Inglaterra, em 1990, na reconstituição digital do Castelo de Dudley (SANTOS; AMORIM, 2010).
[38] Visualização científica (*scientific visualization*) tornou-se um importante campo no final de 1980, quando cientistas e engenheiros perceberam que não poderiam interpretar as grandes quantidades de dados produzidas no supercomputador sem resumir os dados e destacar as suas tendências em vários tipos de representações gráficas, dentre elas vídeos que mostram a ocorrência de determinado fenômeno ao longo do tempo (FOLEY et al., 1990, p. 3).
[39] Foi criada em 1989 por Christopher Langton e pela primeira vez, usada como controle de movimentos de um programa de simulação por Randall D. Beer em 1990 (CEREZO; PINA; SERÓN, 1999, p. 125).
[40] Ver informações mais detalhadas no item 3.2.2.2.2 sobre Técnicas de Modelagem Avançadas.

resultado foi a criação de uma grande variedade desses programas para atender os mais diferentes campos do conhecimento, ao mesmo tempo em que desenvolvia o ramo de simulação computadorizada que produzia suas técnicas tanto para a visualização científica, quanto para a indústria da cinematográfica.

Figura 11 – Visualização do modelo molecular da bicamada de fosfolípido que forma a membrana em torno de todas as células vivas



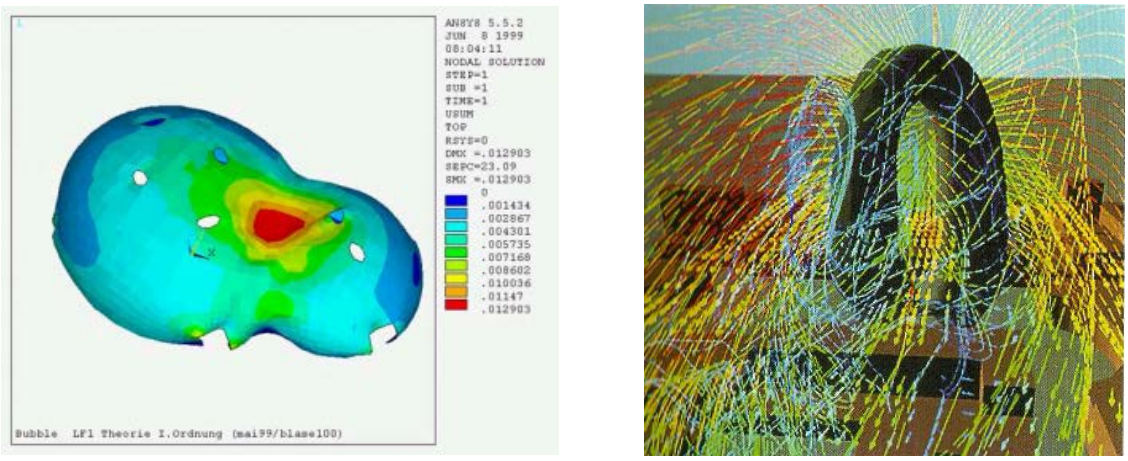
Fonte: HENSEL; MENGES, 2006, p. 18.

Com o tempo, essas técnicas de simulação computacional, principalmente os modelos de fenômenos físicos, foram incorporadas e combinadas com a modelagem de sólidos de modo a aperfeiçoar as ferramentas CAD para área de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC). Essas ferramentas permitiam simulações numéricas do desempenho de obras arquitetônicas e de engenharia, nas fases de desenvolvimento do projeto.

Duas técnicas se sobressaem, a *Finite Element Method* (FEM) e a *Computational Fluid Dynamics* (CFD). A primeira é usada para calcular e analisar esforços estruturais por meio da subdivisão do modelo geométrico do edifício em uma malha composta de elementos e nós (SCHODEK et al., 2005, p. 217), que exibi o resultado da análise em falsa cor, identificando áreas críticas (Figura 12a). A segunda, CFD, é usada para avaliar os fluxos de ar no entorno e dentro do edifício (Figura 12b). O programa de simulação é alimentado com informações do entorno e da atividade do edifício para computar além da dinâmica dos fluxos (de ar, fumaça, água...), as transferências de calor entre o revestimento e o ambiente, e as reações químicas como combustão (KOLAREVIC, 2003, p. 25).

Figura 12 – (a) Análise FEM dos esforços da BMW Bubble de Bernad Franken; (b) análise CFD do fluxo de ar do Project ZED de Future Systems

(a) (b)



Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 24.

Por outro lado, a partir da metade da década de 1990, pesquisadores da área de Arquitetura começaram a usar técnicas de animação e simulação para criar métodos de geração de forma arquitetônica. De maneira similar as pesquisas da década de 70 chamadas de gramática da forma por George Stiny e James Gips, as quais se baseavam no sistema de produção do matemático Emil Post (1943) e na gramática gerativa do lingüista Noam Chomsky (CELANI; CYPRIANO; GODOI, 2007, p. 15).

Essa área de pesquisa de métodos de geração de forma é muito ativa, ainda está em crescimento e, atualmente, é denominada de *Generative Design* (GU; SINGH; MERRICK; 2010, p. 1). Essa abordagem computacional aplica diferentes técnicas de controle de movimento e comportamento, criados para programas de simulação, de modo a conceber formas. Pode-se citar algumas dessas técnicas[41], como rede neurais, algoritmos genéticos, gramática da forma, modelos evolutivos e autômatos celulares.

Um exemplo da aplicação de *Generative Design*, na arquitetura, pode ser visto no National Swimming Pool (2008) na China, que foi projetado pelo escritório PTW Architects (Figura 13). Essa edificação teve a forma inspirada no padrão de formação de bolhas de sabão.

[41] Algumas dessas técnicas foram descritas no item 3.2.2.2.3 sobre Modelagem Procedural.

Figura 13 – “Watercube” National Swimming Pool, PTW Architects, 2007

Fonte: THE PHAIDON..., 2008, p. 104.

Um panorama das principais técnicas juntamente com a sua avaliação crítica pode ser visto em Computer-Based Form Generation in Architectural Design (GROBMAN; YEZIORO; CAPELUTO, 2009), Experimental Design Methods (ACHTEN, 2009) e A Framework to Integrate Generative Design Techniques for Enhancing Design Automation (GU; SINGH; MERRICK; 2010).

Esses métodos geradores, ao serem usados por arquitetos, são entendidos dentro do paradigma denominado “caixa preta”, uma vez que é “[...] um aparelho tecnológico, no qual o usuário tem um completo desconhecimento do que acontece em seu interior, podendo avaliar apenas o que entra e o que sai, através do *input* e *output*, definido pelo programador [...]” (ROCHA, 2009, p. 71). Em outras palavras, os arquitetos, geralmente, não compreendem os mecanismos internos dessas técnicas e somente trabalham inserindo informações nesse sistema, além de analisar o produto. Mais ainda, é comum que essas técnicas possuam um fator randômico durante o processo de geração da forma e por isso o resultado não é conhecido à *priori*.

Assim, pode-se destacar que esse método de concepção valoriza o fator de indeterminação no pensamento de projeto através de sistemas de resultado em aberto que são capazes de gerar diversidade e complexidade. Mais ainda, esse procedimento propõe que o projetista não mais desenhe ou represente a forma pensada à *priori* (*form making*), mas ele procure e avalie entre as formas à *posteriori* (*form finding*) que são resultantes do método gerador, qual a opção se encaixa com sua proposta, uma abordagem batizada por Kolarevic (2003, p.13) de Digital Morfogênese.

Nesse sentido, pode-se perceber a influência e a similaridade com a pesquisa e o trabalho de Frei Otto, que cunhou o termo *form finding*, para designar suas técnicas de criação de sistemas estruturais, como tensionados ou pneumáticos, pelo intermédio de estudos empíricos em

modelos físicos, como os funiculares ou de películas de sabão, entre outros (HENSEL; MENGES; WEINSTOCK, 2010; SCHUMACHER, 2009). O importante a ser destacado é que essa abordagem de *Generative Design* não só propôs uma ferramenta CAD para a fase preliminar do projeto, como também uma mudança no processo de projeto, questionando a predominância da abordagem convencional de criação de formas.

Esse questionamento era um reflexo do debate internacional que acontecia nos anos 90 e que continua sendo discutido atualmente, que abrange processos cognitivos e conceptivos de projeto (NATIVIDADE, 2010, p. 101), tecnologias digitais da era "pós-CAD", experiências de ensino em ambientes computacionais específicos e propostas de paradigmas projetuais digitais a partir de metodologias e conceitos próprios (RÊGO, 2008, p. 97). Esse debate se baseia na ideia de que "[...] o digital é uma interface entre cognição e expressão [...]" (TIERNEY apud NATIVIDADE, 2010, p. 110), pois visa à emulação ou extensão do intelecto humano (TERZIDIS, 2006) através da manipulação do conhecimento utilizando-se de abstrações de alto grau ao invés de objetos, visto que é um dispositivo capaz de representar informações simbolicamente (NATIVIDADE, 2010, p. 111).

O artigo Computational Compositions in Architecture (1988) de Marcos Novak pode ser considerado o marco inicial dessa nova abordagem, pois sua ampla divulgação somente aconteceu no início da década de 1990. Esse artigo preconizou o uso de programas CAD para explorar territórios desconhecidos para a Arquitetura e, também, a desenvolver idéias, não somente sobre o processo de projeto, mas sobre a Arquitetura em si. Desse modo, buscou inspiração em campos externos para propor paradigmas projetuais digitais a partir desses conceitos, que atualmente abrangem a Matemática com termos como topologia e superfície isomórfica; a Filosofia com a dobra (*fold*), a emergência, espaços dobrados, lisos (*smooth*) e estriados (*striated*); a Computação com flexibilidade, conectividade, lógica, procedimentos algorítmicos; a Biologia com a teoria da evolução e *biomimetic*[42]*;*

Esse novo embasamento teórico procurava criar uma Arquitetura que capturasse o espírito da "Era da Informação" através do uso das tecnologias digitais como uma mídia expressiva (KOLAREVIC, 2003, p. 27) e tinha seus interesses voltados para uma discussão mais ampla da Arquitetura no âmbito da tecnologia da informação, demonstrando uma resposta ao ambiente que os rodeia (HAYCOCK, 2002), ao contexto em que vivem, logo à sociedade informacional e digital. Assim, de uma forma geral, essas pesquisas experimentais buscavam

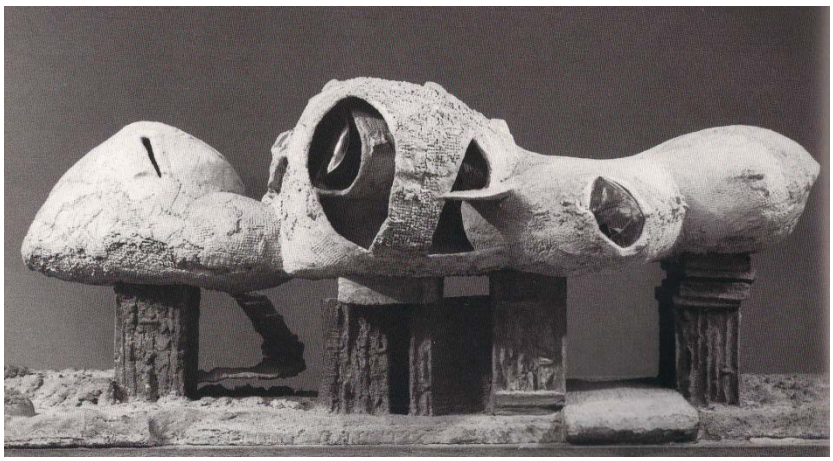
[42] *Biomimetic* é o estudo da estrutura e função dos sistemas biológicos como modelos de inspiração para o projeto de produtos industriais, materiais e máquinas (HENSEL; MENGES; WEINSTOCK, 2010, p. 16).

por novas abordagens paradigmáticas na concepção arquitectônica que se baseavam no impacto cultural da tecnologia digital (OXMAN; ROTENSTREICH, 2005, p. 473).

Comumente, o resultado formal dessas experiências eram formas complexas, curvilíneas e amebóides, similar a Endless House (Figura 14) de Frederick Kiesler (1936-1950), o que estabelecia um formalismo denominado de Blobitecture por Greg Lynn em seu trabalho Folds, Bodies & Blobs: Collected Essays de 1998. Primeiramente, essas formas típicas eram consideradas resultado da ampliação do uso da modelagem de formas livres[43] (*free-form deformation*) por arquitetos (MCCULLOUGH, 2006).

Mas, de acordo com Picon (2010, p. 63-64), não eram simplesmente arbitrárias, mas sim formadas, por um lado, pela reação contra as formas fragmentadas do Desconstrutivismo, por outro, pela expressão formal e literal da aplicação do conceito de dobra de Deleuze para representar o contexto de complexidade atual em uma forma que tenta fundir elementos díspares de maneira contínua. Em ambos os casos o resultado enfatizava, em sua maioria, o uso de formas curvas em suas propostas. Devido ao amplo uso de formas curvas de alto grau de complexidade, resultantes dessas experiências, sua viabilidade construtiva passava sempre a ser contestada, levando a serem tratadas como um novo “modismo” na Arquitetura.

Figura 14 – Endless House de Frederick Kiesler



Fonte: ROSA, 2003, p. 18.

Essa falta de credibilidade causou reações como a de Peter Cachola Schmal, que publicou o livro Digital Real-Blobmeister: first built projects (2001), mostrando alguns projetos executados no final da década de 1990, dentre eles, pode-se destacar dois exemplos representativos: o Bubble BMW Pavilion (Figura 15) projetado por Bernhard Franken na

[43] Ver item 3.2.2.2 sobre Métodos de Transformação de Superfícies.

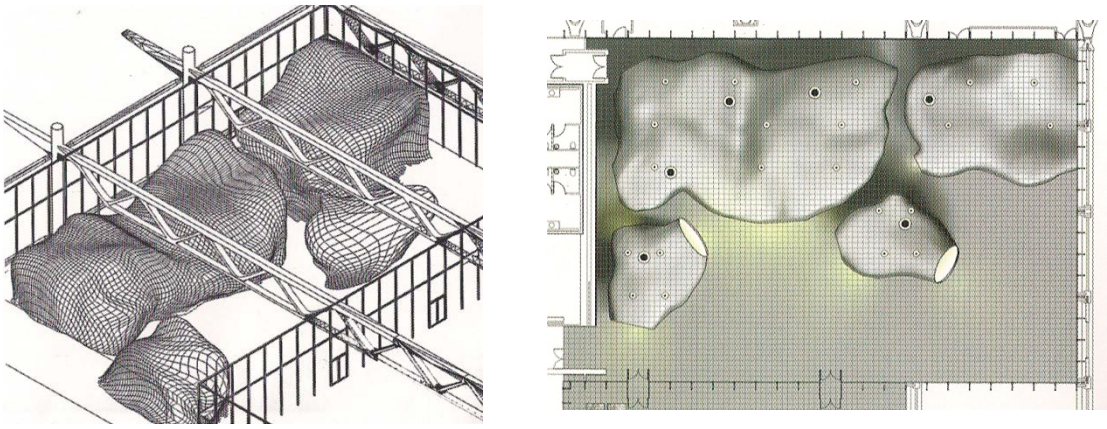
Alemanha e o Restaurante Le Georges (Figura 16) projetado por Jacob e McFarlane na França, ambos no ano de 1999.

Figura 15 – Bubble BMW Pavilion

Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 21.

Figura 16 – Modelo geométrico do Restaurante Le Georges: (a) perspectiva; (b) vista superior

(a) (b)



Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 187-188.

Entretanto, de uma forma geral, pode-se afirmar que a questão da viabilidade construtiva foi esclarecida com a construção do Museu Guggenheim de Bilbao, do arquiteto Frank Gehry (1992-1997). Foi sua aplicação inovadora do uso de ferramentas CAD no processo de projeto e construção, usado para viabilizar a forma e controlar máquinas de comando numérico, que estabeleceu precedentes para a integração de sistemas computacionais ao longo do processo de projeto, desenvolvimento e construção de obras arquitetônicas (OXMAN, 2006, p. 234).

A partir desse momento, os processos de trabalho nas construções foram mudando com a introdução dos primeiros sistemas CAD/CAM[44] para arquitetura, denominado de Fabricação Digital (*Digital Fabrication - DF*) por Kolarevic (2003, p. 32) e Shodek e colaboradores (2005). A DF, conforme Pupo (2009, p. 102), refere-se ao uso das tecnologias de controle numérico computadorizado (CNC), sugerindo a transferência de dados de um programa de

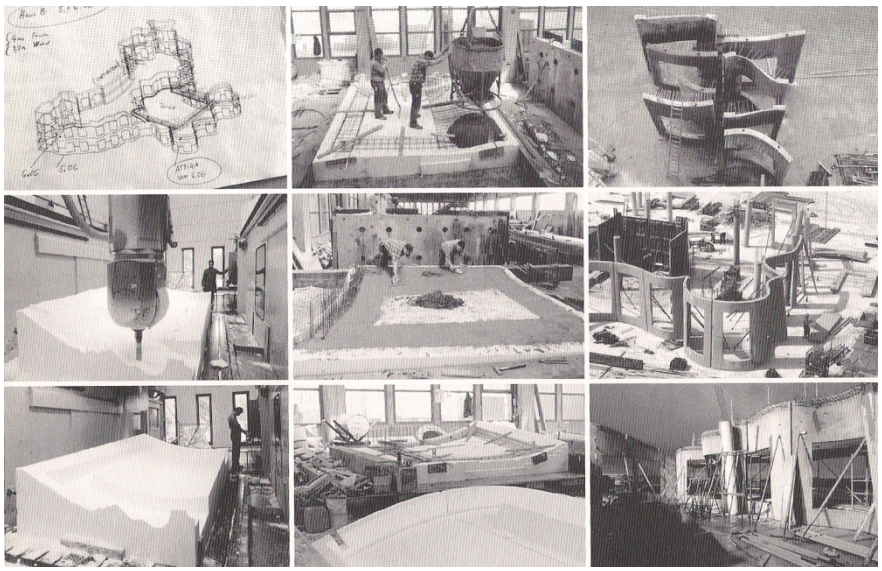
[44] Fabricação auxiliada por computador (*Computer Aided Manufecture* – CAM).

modelagem geométrica 3D para fabricação direta em máquina CNC, que ficou conhecido como *file-to-factory*. Segundo Pupo:

> [...] a fabricação digital permite resultados variáveis e não repetitivos. Induz ao conceito de *mass-customization* (customização em massa) permitindo o desenvolvimento de sistemas construtivos não padronizados através de diferenciações seriais e variações digitalmente controladas. Suas aplicações na arquitetura e construção são as mais variadas, desde a produção de fôrmas para concreto armado com formas especiais até a produção de ornamentos esculpidos em pedra que podem ser utilizados como "próteses" arquitetônicas em obras de restauro. (PUPO, 2009, p. 102)

Foi essa junção entre CAD e CAM que tornou possível a construção de formas tão complexas, de uma maneira rápida e num valor acessível (KOLAREVIC, 2003). Entretanto, esse ainda era um método novo que precisava de refinamento e de novas técnicas que são pesquisadas até hoje, num processo referido como racionalização da geometria (POTTMANN, 2010, p. 74). Um panorama das principais técnicas de racionalização pode ser visto em Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques (IWAMOTO, 2009).

Figura 17 – Processo de fabricação digital de parte do Der Neue Zollhof



Fonte: SCHMAL, 2001, p. 102.

A Figura 17 ilustra o processo de fabricação digital, desde a concepção da forma arquitetônica à construção da fôrma do elemento construtivo em poliestireno pela fresa CNC, aplicação das armaduras e concretagem sobre a fôrma, e instalação do elemento construtivo *in loco*. Esse exemplo é referente ao complexo B do Der Neue Zollhof (1999) na Alemanha, que foi projetado por Frank Gehry.

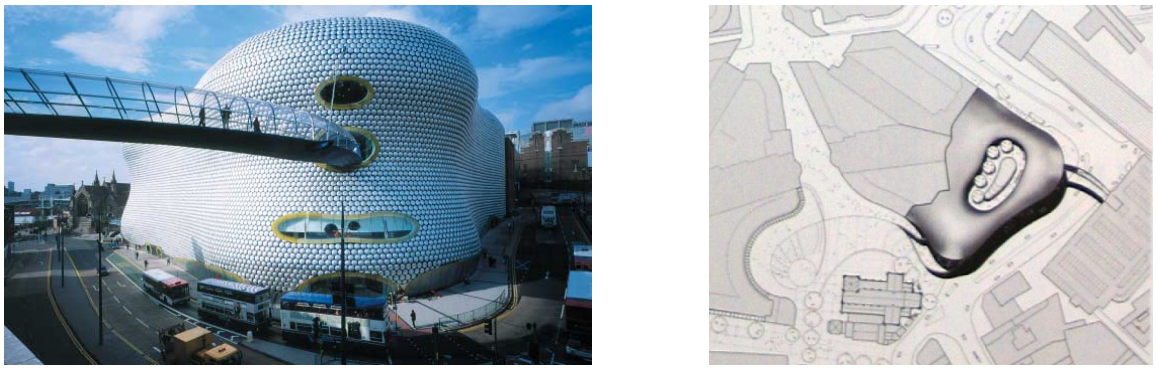
2.1.6 Década de 2000

Na década de 2000 amplia-se cada vez mais o interesse nas possibilidades de aplicações de CAD na Arquitetura, representadas pelas pesquisas de caráter experimental da década passada, dando continuidade a elas e produzindo um corpo extenso de publicações diversificadas. Essa situação configurou o que tem sido chamado de *Digital Design* (OXMAN, 2006) ou Arquitetura Digital (OXMAN, 2008). Ao longo da década de 2000 foi consolidado esse interesse mediante a presença dessa linha em publicações especializadas como o *International Journal of Architectural Computing*, criado em 2001, e edições especiais da *Architectural Design*. Mais ainda, na educação com programas de pós-graduação com linhas de pesquisas nesse ramo, como o *Emergent Technologies and Design* (2001) da *Architectural Associantion* em Londres e a *Biodigital Architecture* (2001) da *Universitat Internacional de Catalunya* em Barcelona.

Além disso, sua presença se propagou em concursos internacionais de arquitetura por escritórios dedicados ao assunto como Asymptote, ONL Studio, NOX, Foster and Parterns, Zaha Hadid, Greg Lynn Form, Foreign Office Architects (FOA), Future Systems, entre outros. Igualmente, em obras construídas como *London City Hall* (2002) do Foster and Partners, *Birmingham Selfridges Store* (2003) do Future Systems, *Allianz Arena* (2005) do Herzog & de Meuron e *The Yas Hotel* (2009) do Asymptote. Mais ainda, em exibições culturais como a exibição *Non-Standard Architectures* realizada no Pompidou Center, Paris em 2003, ou na premiação para projetos de Arquitetura Digital, o *The Far Eastern International Digital Design Award* (FEIDAD) criado em 2000.

Figura 18 – Birmingham Selfridges Store: (a) fotografia da entrada; (b) planta de situação

(a) (b)



Fonte: (a) CLARK; GILPIN, 2005, p. 10; (b) THE PHAIDON..., 2004, p. 275.

Figura 19 – The Yas Hotel, Asymptote, 2009

Fonte: ARUP, 2012.

Esse cenário não apresentava nenhuma linha de pensamento unificada, demonstrada na tamanha diversidade de publicações, o que instigou tentativas de consolidação de um quadro teórico da Arquitetura Digital, especialmente na literatura internacional, que demonstravam, conforme Rêgo:

> [...] certo consenso de que a introdução das ferramentas digitais na prática arquitetônica atingiu um estágio no qual a adaptação dos antigos paradigmas não responde adequadamente às demandas e especificidades do processo projetual em ambiente computacional. (RÊGO, 2008, p. 97)

Essas tentativas foram encabeçadas por Oxman (2006), que propõe estruturar esse quadro em cinco classes paradigmáticas de modelos de projetação digital: *CAD Model* (1), *Generative Model* (2), *Performace Model* (3), *Formation Model* (4) e *Integrated compound model* (5). O primeiro (1) trata do uso mais convencional de programas CAD, principalmente, como ferramentas para produção de documentação projetual (*draft systems*) e de apresentação (modeladores geométricos e *rendering*) e que manteve alguns procedimentos dos antigos paradigmas[45].

O *Generative Model* (2) e o *Performace Model* (3) abrangem a ampliação e o aprofundamento dos métodos descritos no item da década de 1990 criando novos paradigmas projetuais, sendo o primeiro baseado nos métodos de geração de forma e o segundo nos métodos de análise do desempenho do edifício. Além disso, o *Generative Model* (2) começa a produzir exemplos construídos das formas criadas pelos métodos de geração. Geralmente, esses exemplos são protótipos ou estruturas de pequeno porte resultantes de pesquisas dos programas de pós-graduação (Figura 20), mas apontam caminhos para a sua aplicação para a área de AEC.

[45] Ver item 2.1.4 na parte sobre “prancheta eletrônica”.

Figura 20 – (a) Protótipo do estudo sobre malhas hexagonais do mestrado de Andrew Kudless (2004); (b) *AA Membrane Canopy* - cobertura projetada e construída pelos estudantes de mestrado de 2007 do Architectural Association

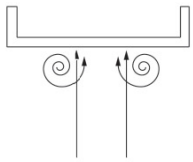
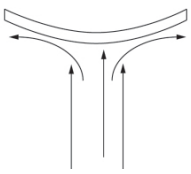
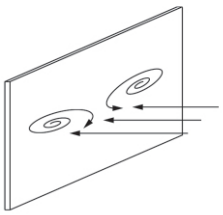
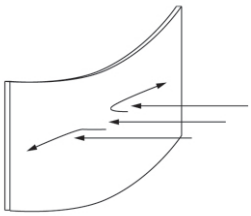
(a) (b)

Fonte: HENSEL; MENGES; WEINSTOCK, 2010, p. 187 e 50.

O *Performace Model* (3), segundo Kolarevic (2005, p. 195), foi reforçado na década de 2000, em grande parte, devido ao aumento do debate sobre sustentabilidade durante esse período. Nesse novo paradigma, o objeto arquitetônico é resultado dos processos de avaliação do desempenho da edificação, o qual está entre as principais diretrizes de projeto, considerado no mesmo patamar ou acima da concepção formal.

O desempenho pode avaliar o comportamento do edifício, desde a criação à demolição, contendo em si, uma ampla gama de análises. Podendo passar desde a estrutura, quanto pela térmica e energética, até ao impacto ambiental, todas sendo avaliadas simultaneamente. No Quadro 1 é ilustrado um exemplo simplificado de geração de forma por desempenho, mostrando a modificação da forma da parede para se tornar mais aerodinâmica, e assim, diminuir os esforços estruturais causados pelos ventos.

Quadro 1 – Esquema de geração de forma por desempenho, mostrando a trajetória dos ventos antes e depois das modificações na parede

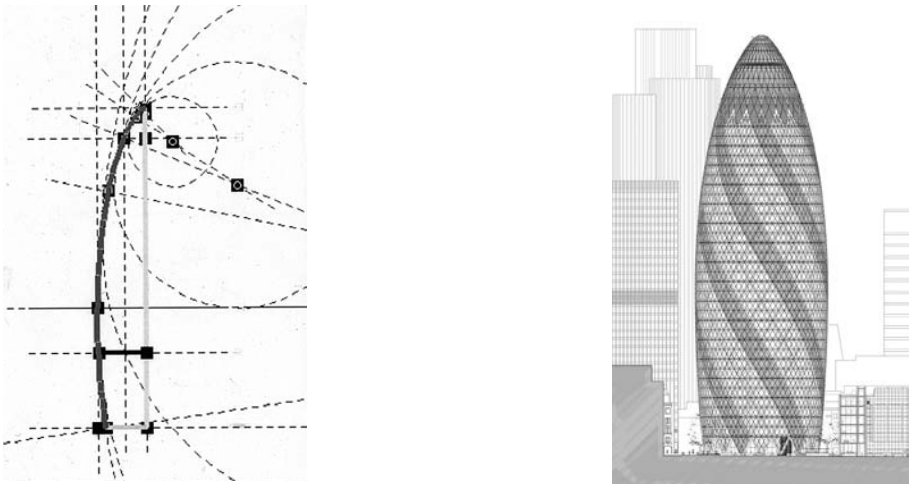
	Antes	Depois
Planta Baixa		
Perspectiva axonométrica		

Fonte: adaptada de PANCHUK, 2006, p. 17.

O *Formation Model (4)*, como o próprio nome sugere, é o processo de *formação* do objeto arquitetônico mediante lógicas e regras estruturantes que oferecem um maior controle ou interação das características geométricas ou formais do objeto. Entre as três classes desse modelo definidas por Oxman, a topológica, a dinâmica e a associativa, destaca-se a última. Isso por que essa classe associativa se baseia em técnicas de modelagem paramétrica (MP) para explorar a geometria associativa[46] (criação de objetos complexos por meio da definição de elementos geométricos e das relações entre eles). A Figura 21 (a) ilustra um modelo paramétrico para a formação da curva definidora da curvatura da superfície externa do 30 St. Mary Axe, pela composição de regras geométricas.

Figura 21 – 30 St Mary Axe: (a) esquema representando o modelo paramétrico; (b) elevação

(a) (b)



Fonte: (a) ABEL, 2004, p. 153; (b) FOSTER AND PARTNERS, 2005, p. 1.

No começo da década de 2000, a MP entra em evidência, pois surgiu uma nova geração de programas de MP com novas capacidades de gerenciamento de dados que tornou seu uso prático (MITCHELL, 2006, p. 4; CELANI, LAZARINI, 2007). Mais ainda, esse destaque foi impulsionado pelo emprego de MP por um dos precursores de adoção de ferramentas de outras disciplinas na arquitetura: Frank Gehry ao usar o CATIA[47]. O *Formation Model* na sua classe associativa pode, de maneira similar ao utilizada por Gehry, dar apoio à concepção e ao desenvolvimento do projeto de formas não convencionais pelo intermédio das propriedades da MP de maior controle das propriedades do objeto, que serão descritas no item 2.2.

Assim, essa capacidade de maior controle de interação com configurações geométricas se tornou um estímulo para o emprego de ferramentas de MP, atingindo um limite a ser aplicado em formas de alto nível de complexidade, uma vez que essas formas geram grandes

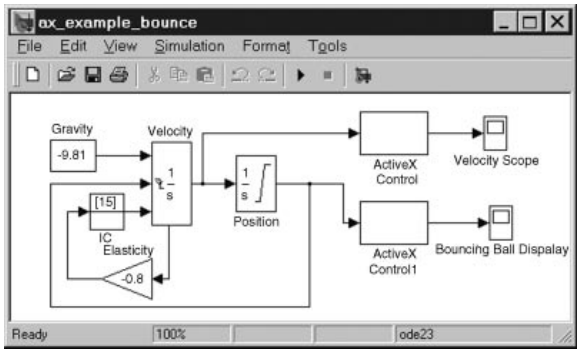
[46] Ver item 2.2.2.2, no qual Burry (2003) explica tal definição.
[47] Ver item 2.1.5 sobre a década de 1990.

quantidades de relações entre os elementos. Para esses casos, Davis, Burry e Burry (2011, p. 55-56) relatam uma percepção na legibilidade dessa configuração de relações que poderia ser melhorada com a aplicação de linguagem de programação e suas propriedades estruturadoras. Maleki e Woodbury (2010, p. 118) acrescentam que o uso de programação liberta o usuário das limitações da interface de *direct manipulation*[48], que reduzem o conhecimento e entendimento sobre a implementação da modelagem geométrica para focar-se na sua operacionalidade. Tem-se como exemplo, as manipulações por pontos de controle[49], nas quais o usuário manipula a forma do objeto sem ter conhecimento dos conceitos avançados de Geometria e Matemática necessários para operá-los, como a definição matemática das curvas[50], como a NURBS.

Por outro lado, a possibilidade do emprego de programação em ferramentas CAD é antiga e foi explorada por alguns arquitetos[51], mas teve pouco impacto até hoje devido ao alto nível de complexidade dos códigos, exigindo habilidades de programação especializadas (MCCULLOUGH, 2006, p. 13). Porém, essa situação mudou com novas linguagens de programação, especialmente, as linguagens visuais[52] (Figura 22a) que por ser uma interface gráfica pode facilitar a curva de aprendizagem de um projetista e por isso ser particularmente aplicável a ferramentas CAD.

Figura 22 – Linguagem de programação: (a) visual; (b) em texto

(a)



(b)

```
1  function P return INTEGER
2  begin
3      X, Y:INTEGER;
4      READ(X); READ(Y);
5      while (X > 10) loop
6          X := X - 10;
7          exit when X = 10;
8      end loop;
9      if (Y < 20 and then X mod 2 = 0) then
10         Y := Y + 20;
11     else
12         Y := Y - 20;
13     end if;
14     return 2 * X + Y ;
15 end P;
```

Fonte: WAH, 2008.

O uso de programação visual na modelagem para arquitetura cresceu notadamente com a chegada do *Generative Components* da *Bentley* por volta de 2003 e, posteriormente, do *plug-in Grasshopper* para *Rhinoceros* da *McNeel* em 2007 (DAVIS; BURRY; BURRY, 2012).

[48] Interface que passa a sensação de manipular diretamente os objetos visualizados no programa de modelagem, e não através de comandos de modelagem do programa em si (MALEKI; WOODBURY, 2010, p. 120).
[49] Ver item 3.2.2.2, sobre métodos de transformação de superfícies.
[50] Ver item 3.2.1.1, Definição de Curvas.
[51] Por exemplo, Mitchell, Ligget e Kvan com seu livro *The art of computer graphics programming* (1987).
[52] É uma linguagem de programação gráfica baseada em fluxograma de dados.

Como resultado, há uma crescente retomada do interesse no emprego de linguagens de programação para a construção de modelos paramétricos[53], principalmente, mediante um suporte à programação (*end-user programming*) oferecido pelos programas CAD (MCCULLOUGH, 2006). Percebe-se pelas publicações dedicadas ao assunto como a edição especial da *Architectural Design* intitulada *Programming Cultures* (2006) e seu livro básico (*primer*[54]): *Scripting Cultures* (2011), afora o *Algorithmic Architecture* (2006) do arquiteto Kostas Terzidis.

Outro motivo para a crescente aplicação e importância da MP, na década de 2000, é o fato de estar na base dos mecanismos complexos de geração de forma dos *Generative Model* (OXMAN, 2006, p. 253), ao possibilitar a criação e manipulação das relações paramétricas, transformações e *constraints*[55] entre os múltiplos elementos (MADKOUR; NEUMANN; ERHAN, 2009, p. 589) desses métodos de geração de formas.

Da mesma maneira, a MP se encontra na base do *Integrated compound model* (5), definido por Oxman, como a combinação entre os modelos anteriores em um processo de projeto integrado entre qualquer atividade de projeto, com o fluxo de dados e de informações em múltiplas direções. Além disso, a autora aponta o *Integrated compound model* como paradigma futuro para os processos integrados de projeto.

Pode-se considerar como pertencente ao *Integrated compound*, a Modelagem de Informação da Construção (*Building Information Modeling* - BIM), pois uma das metas do BIM seria definir um processo de projeto integrado entre as diferentes disciplinas da indústria de AEC, suportando as diferentes fases do projeto e da construção da edificação. O BIM é destacado no presente item, pois foi no começo dos anos 2000 que ele extrapolou a esfera da pesquisa, a qual se estendeu por trinta anos, para conseguir viabilizar ferramentas comerciais (EASTMAN et al., 2010, p. 353). Atualmente, tornou-se um dos assuntos mais pesquisados e discutidos dessa década (ACHTEN, 2009, p. 513).

Esse longo período de pesquisa começou na década de 1970, onde os primeiros trabalhos se enquadravam na segunda frente de pesquisa, descrita no item 2.1.3, e por isso defendiam que a ferramenta CAD deveria estar mais voltada para a área de construção, funcionando em um ambiente computacional que trabalhasse dentro do vocabulário e das convenções dessa

---

[53] Ver outras informações no item 2.2.3, sobre vantagens e limitações da Modelagem Paramétrica.
[54] Um livro fundamental, que serve como uma introdução a um tema de estudo.
[55] *Constraints* (pode ser traduzido como regras de restrições) são um conjunto de regras que definem um "comportamento" para elementos geométricos, por exemplo, regras de paralelismo. Ver mais detalhes no item 2.2 sobre modelagem paramétrica.

indústria. Para tanto, era necessário que essa ferramenta suportasse um modelo que capturasse todas as informações do projeto e da construção de um edifício (ACHTEN, 2009, p. 513), ou seja, fosse uma ferramenta dedicada.

Apesar de outras áreas (como eletrônica) já terem alcançado esse objetivo no final da década de 1980[56], o mesmo não foi possível para a AEC, visto que, naquele momento, a tecnologia usada (modelagem paramétrica) para essas áreas descreviam objetos desproporcionalmente menores e menos complexos que o produto da indústria da construção. Tendo sido constatado que essa tecnologia não suportava tal complexidade ao se tentar adaptá-la para descrever toda a forma, os sistemas, as funcionalidades e os componentes de uma edificação (AISH, 2003, p. 246). Essa dificuldade de construir um sistema que suportasse essas características, se tornou um dos problemas que retardaram a criação de uma ferramenta comercial BIM (KALAY, 2004, p. 74).

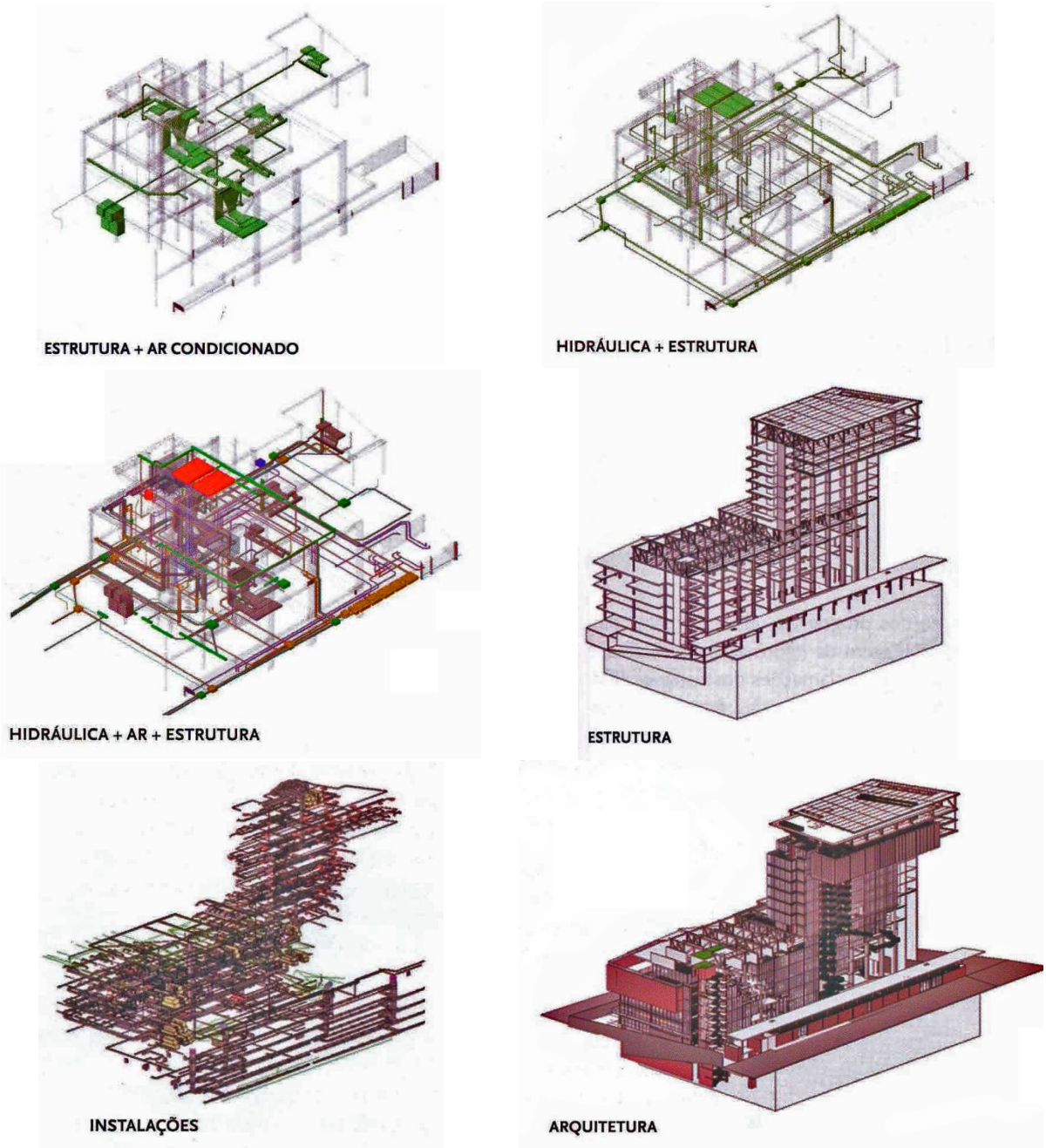
Além disso, esse sistema deveria coordenar não só as atividades desenvolvidas por diferentes disciplinas, mas também as diferentes fases de projeto, as quais exigem diferentes tipos de representação do edifício (EASTMAN, 1989), e ainda, ao longo do seu ciclo de vida[57]. Em ambos os casos, o armazenamento, a visualização e o compartilhamento dos dados referentes à edificação deveriam estar contidos em um único modelo, que seria "[...] um repositório integrado de informações acessado por todos os envolvidos no desenvolvimento do edifício" (AYRES FILHO, 2009, p. 3).

Mais ainda, as dificuldades financeiras também restringiram o desenvolvimento da tecnologia BIM, primeiro com o elevado custo dos computadores de alto desempenho durante os anos 80, depois, com a adoção generalizada dos *drafts systems* e modeladores geométricos em computadores pessoais (LAWSON, 1998, p. 55). Assim, para viabilizar essa ferramenta foi necessário atender a uma lista de critérios, o que foi alcançado com o desenvolvimento de algumas tecnologias. Primeiramente, da área de modelagem de dados, que possibilitou a criação de um banco de dados independente da aplicação CAD, facilitando não apenas a comunicação das informações contidas nele para diferentes ferramentas, como também, a definição de várias visualizações sobre um mesmo dado (AYRES FILHO, 2009, p. 18). Mais ainda, resultou na criação dos *Object Database*[58] (KALAY, 1999, p. 23), base para a *object-oriented building product modeling* que permitiu que um edifício possa ser

[56] Ver item 2.1.4, sobre a década de 1980.
[57] Da concepção à construção, utilização e demolição.
[58] Banco de dados que armazena as informações que definem a natureza e as características do objeto e as condições em que ambos serão alterados (KALAY, 1999, p. 23).

representada/modelado por objetos inteligentes que carreguem a informação detalhada sobre si mesmos e também compreendem a sua relação com outros objetos (EASTMAN *et al*, 2011). No caso do BIM, que se comportem como objetos da área da construção, por exemplo, paredes, janelas e portas, e não linhas e superfícies.

Figura 23 – Diferentes modelos "BIM" das diferentes disciplinas da área de AEC para o mesmo edifício



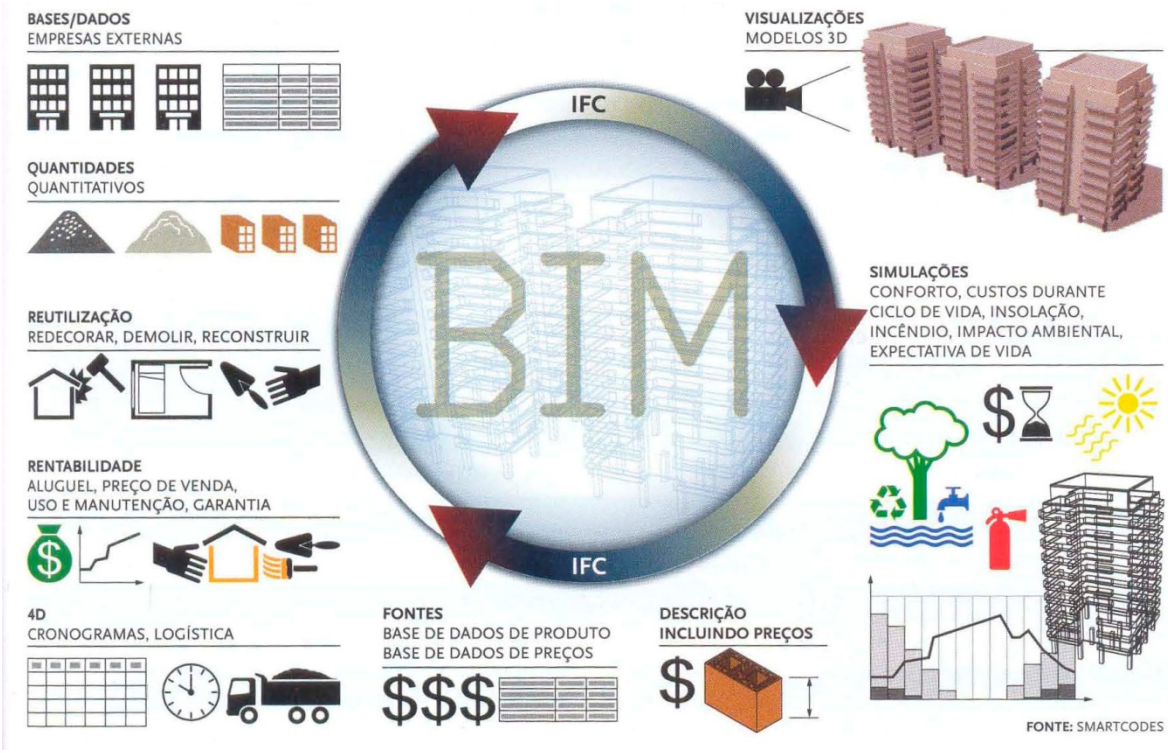
Fonte: ROSSO, 2011, p. 63.

Por outro lado, razões sociais e comerciais também incentivaram ao desenvolvimento do BIM. Como por exemplo, a globalização da indústria da construção na década de 1990, juntamente com o novo papel dos computadores como dispositivos de telecomunicações,

devido em grande parte ao surgimento da Internet, resultando no surgimento do projeto colaborativo (KALAY, 1999, p. 20), para o qual uma ferramenta BIM seria oportuna.

Em resumo, BIM é um paradigma baseado em modelagem de sólidos, e paramétrica, com banco de dados e linguagem de programação orientada a objetos, com uma interface de múltiplas representações e uma comunicação baseada na rede mundial de computadores (EASTMAN, 1999, p. 72). Atualmente, ainda não foi possível viabilizar todo o potencial das características do BIM, que é muito mais complexo do que o descrito nesse item, mas algumas ferramentas comerciais estão disponíveis, como Revit da Autodesk e ArchiCAD da Grafisoft, dentre outros.

Figura 24 – Esquema mostrando os diferentes tipos de informação que uma ferramenta BIM produziria



Fonte: ROSSO, 2011, p. 61.

Ao longo da década de 2000, foram realizadas pesquisas com essas ferramentas disponíveis e foram observadas vantagens e limitações em seu uso pelas empresas e escritórios de profissionais que implementaram o BIM em seu processo de trabalho. Uma das principais vantagens observadas, conforme Souza, Amorim e Lyrio, (2009, p. 50), é a economia de tempo, devido à automatização da documentação projetual, e elevação no nível de qualidade do projeto, graças a uma maior facilidade de compatibilização e diminuição de conflitos entre projetos.

Já as limitações percebidas são as necessidades de estabelecimento de um padrão para uso do BIM, abrangendo bibliotecas de materiais e produtos correntes com o mercado. Além disto, a interoperabilidade entre os vários projetos ainda não está funcionando adequadamente, o que eventualmente exige processos manuais de reentrada de dados e verificação de conflitos (SCHEER; AYRES FILHO, 2009, p. 593).

De uma forma geral, o importante a se destacar é que o BIM se encontra em estágio inicial de desenvolvimento e que sua implantação plena requererá uma maneira diferente de trabalhar de todos os membros da equipe de projeto (ACHTEN, 2009, p. 513).

2.2 A Modelagem Paramétrica

A Modelagem Paramétrica (MP) permeia muitas pesquisas em projeto auxiliado por computador dos últimos anos[59], principalmente na produção científica internacional. Nessas pesquisas existem várias definições de diferentes autores, cada qual, voltada para uma área, ora técnica, ora teórica, ora voltadas para aplicações específicas, ora mais generalizadas. No presente item serão discutidas essas diferentes visões sobre o assunto, iniciando com o surgimento da MP, seguido sobre a definição que a fundamenta apresentada em níveis de complexidade, do mais simples para o mais completo (do nível 1 ao 3). Por fim, mostrando as vantagens e limitações do seu uso, principalmente para aplicações em Arquitetura.

2.2.1 A Origem da Modelagem Paramétrica

A Modelagem Paramétrica (MP) surge como proposta para resolver problemas de modelagem geométrica tridimensional na representação e na produção de objetos de forma complexa. Tal situação era encaminhada com a criação de modelos complexos através da combinação de diferentes tipos de superfícies. Nessa época, definir uma forma 3D era um processo complexo, repetitivo e propenso a erro, uma vez que o usuário deveria realizar todas as operações de edição e combinação das superfícies. Como, por exemplo, cortar e aparar as partes de superfícies externas a interseção entre duas superfícies, de modo a torná-las uma só e repetir esse procedimento em várias outras superfícies para representar com precisão a forma de um objeto complexo, à exemplo de um peça mecânica (EASTMAN, 1999, p. 42). Para que esses programas se tornassem ferramentas práticas de projeto era necessário que

[59] Vale a pena ressaltar, que a MP não deve ser confundida com o conceito de equação paramétrica na Computação Gráfica, usada para definir matemáticamente superficies geométricas (LEE; SACKS; EASTMAN, 2006, p. 760), podendo ser visto no item 3.2.1, os métodos matemáticos de definições de superfícies.

possuíssem a "[...] capacidade de editar e modificar facilmente formas complexas [...]" (EASTMAN et al., 2011, p. 33).

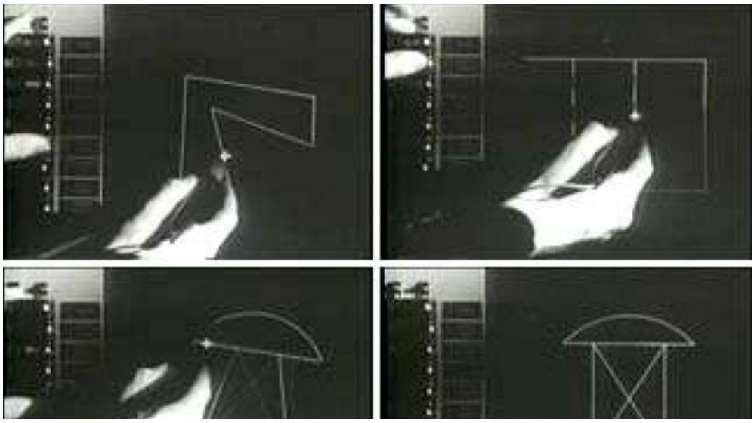
Segundo Eastman e colaboradores (2011, p. 37), um importante passo nessa direção foi realizado no começo da década de 1970 com a criação da Modelagem por Sólidos (*Solid Modeling*), nos Estados Unidos, simultaneamente em duas abordagens diferentes. Por um lado, Ian Braid da Universidade de Cambridge propôs as Superfícies Limitantes (*Boundary Representation* ou *B-rep*) e pelo outro lado, Ari Requicha e Herb Voelcker da Universidade de Rochester apresentaram a Geometria Sólida Construtiva (*Constructive Solid Geometry* ou CSG). Isso porque ao incluir operações de combinação de volumes (as operações booleanas[60]) automatizou as pequenas ações de edição antes realizadas pelo usuário e simplificou a criação de objetos mais complexos (EASTMAN, 1999, p. 42-43).

Esses programas precisavam de computadores de alta capacidade, por isso seu uso foi limitado a indústria, e seu desenvolvimento ficou estagnado até que a capacidade de processamento computacional crescesse até um patamar compatível. Enquanto isso, diferentes tipos de pesquisas foram realizadas para continuar a ampliar as opções de modelagem de sólidos (MONEDERO, 2000, p. 372; SACKS; EASTMAN; LEE, 2004). Na metade da década de 70, um sistema híbrido entre CSG e B-rep tinha a característica de gravar as operações realizadas para criar um modelo sólido em ordem cronológica num registro (*history log*) e editavam as operações através desse registro ao invés do modelo diretamente (SACKS; EASTMAN; LEE, 2004, p. 293).

Depois, em 1978, Hillyard e Braid ampliaram o conceito de regras de restrições (*constraints*), que já aparecia em 1963 no trabalho de Ivan Sutherland, para criar variações paramétricas. As *constraints* de Sutherland consistiam em um auxílio de correção no ato de projetar um elemento geométrico através de restrições pré-estabelecidas (LIN; GOSSARD; LIGHT, 1981, p. 171), como por exemplo, corrigir desenhos irregulares ao se indicar relações de paralelismo ou perpendicularidade entre linhas ou por aproximação às formas geométricas básicas como, por exemplo, um retângulo (Figura 25).

[60] Ver item 3.2.2.2 sobre Métodos de Transformação de Superfícies

Figura 25 – Exemplo de possíveis ações das *constraints* de Sutherland



Fonte: NATIVIDADE, 2010, p. 69.

No mesmo ano, Gopin fez o primeiro uso de grafos[61] para definir e modificar a geometria de um objeto numa ferramenta CAD interativa. Por fim, em 1981, Gossard e Light demonstraram que as propriedades geométricas também poderiam ser utilizadas como regras de restrições, e não somente as dimensões (LIGHT; GOSSARD, 1982, p. 209; MONEDERO, 2000, p. 372).

Cada uma dessas variadas abordagens possuía algum recurso precursor das características do conceito atual da MP, sendo esta considerada resultante da evolução dos programas de modelagem de sólidos (SHAPIRO; VOSSLER, 1995, p. 45). Assim, esse esforço de pesquisa criou os fundamentos da MP, tanto que, no final da década de 80 foi viabilizado o primeiro programa comercial de modelagem paramétrica para indústria, o Pro/ENGINEER da PTC (LEE; SACKS; EASTMAN, 2006, p. 760).

2.2.2 Definição e Características

Ao se pesquisar sobre a definição da Modelagem Paramétrica (MP), é comum se deparar com diferentes ênfases e visões sobre este assunto. Pode-se vê-la como: uma subárea da Computação Gráfica (HOFFMAN; JOAN-ARINYO, 2002), um recurso de modelagem para viabilizar a implementação de ferramentas BIM (EASTMAN et al., 2011), um recurso para gerar e controlar formas complexas (BURRY; MURRAY, 1997), uma ferramenta com potencial para geração semi-automática de formas (AISH; WOODBURY, 2005), uma maneira de possibilitar um novo estilo de arquitetura (SCHUMACHER, 2009), entre outros enfoques.

[61] Um grafo é uma estrutura matemática usada para representar as relações entre diferentes elementos. Comumente, usa-se uma representação gráfica em rede formada por nós (geralmente círculos) que são ligados por arestas (linhas).

Contudo, apesar dessas diferentes abordagens, elas não são contraditórias e existe um cerne comum que foca a MP como uma tecnologia de modelagem computacional para a produção e a edição de objetos complexos, sendo esse, o foco principal para a descrição das principais características a seguir.

2.2.2.1 Definição de Nível 1: rudimentar

Numa visão elementar, a Modelagem Paramétrica (MP) pode ser definida como a utilização de parâmetros para definir e controlar a forma do objeto (MONEDERO, 2000, p. 371). Tal definição oferece poucas informações, que a torna muito abrangente. Desse modo, pode-se inserir as abordagens anteriores a MP, na representação ou criação de formas através de ferramentas CAD, as quais se baseavam no estabelecimento de série de parâmetros durante esses processos. Em maiores detalhes, esses programas possuíam um *template* (meta-modelo) para cada tipo de forma "padrão" (à exemplo de um poliedro qualquer) a ser criada, composto por regras de construção geométrica dessa forma e alguns parâmetros[62] "em aberto". Esses parâmetros eram dados de entrada (*input*) que deveriam ser preenchidos com valores especificados pelo usuário no momento de "instanciação" de um dado objeto (MONEDERO, 2000, p. 371), na medida em que a forma já havia sido previamente concebidas através do meta-modelo.

Por exemplo, para se "criar" um paralelepípedo, é requerido do usuário apenas as informações de sua localização (e orientação), e suas dimensões, visto que o objeto a ser "criado" possui registrado no seu *template* suas propriedades matemáticas. Segundo, Lee, Sacks e Eastman (2006, p. 760), essa abordagem foi chamada de Modelagem Orientada à Dimensão (*dimension-driven modeling*), pois as características dimensionais dos elementos eram os únicos parâmetros a serem definidos pelo usuário e devido a essa limitação não foi considerada como MP.

Uma das primeiras "formas rudimentares" (MONEDERO, 2000, p. 373) de modelagem paramétrica é a utilização do suporte a programação (*end-user programming*), oferecido por esses programas para criar um *script* que contem uma série de comandos, e de dados que devem ser preenchidos pelo usuário, de modo a guiar a ferramenta de modelagem através de uma sequência de passos para construir um determinado tipo de objeto. Esses passos são executados pelo programa e dessa maneira são automatizadas várias etapas da criação do

[62] Oriundo da matemática, na qual se refere a um fator que controla os valores de outro fator em uma relação linear (HERNANDEZ, 2006b, p. 23).

objeto, cabendo ao usuário somente fornecer alguns parâmetros (características essenciais) do objeto. Para ilustrar essa situação, ver no item 2.1, o exemplo da representação automatizada de escadas.

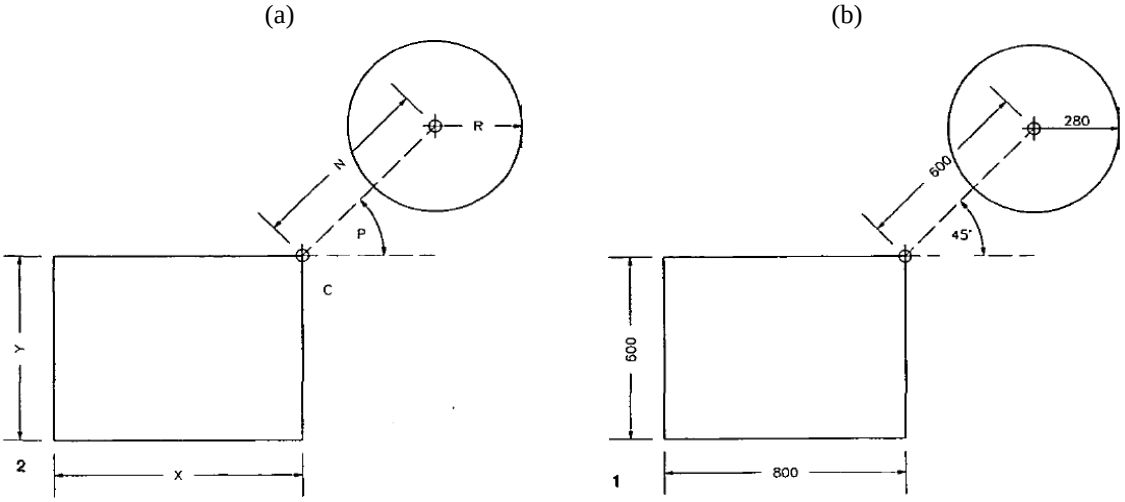
Em ambos os casos apresentados, com ou sem o uso de programação, faltam algumas características essenciais para se alcançar uma definição de Modelagem Paramétrica mais completa. No primeiro, o usuário não pode escolher com mais autonomia, quais parâmetros ou seus tipos, serão usados para criar uma forma geométrica. No segundo, apesar de haver mais opções para os tipos de parâmetros, uma vez criado o modelo, esse não pode ser modificado mediante a mudança de valores dos parâmetros iniciais, essa modificação somente é possível por meio de operações de transformações geométricas executadas uma a uma pelo usuário (ver 3.2.2.2 sobre Métodos de Transformação de Superfícies). Logo, tanto no primeiro, quanto no segundo caso, os parâmetros iniciais (*input*) ficam inacessíveis após a "criação" da forma (EASTMAN, 1999, p. 44).

2.2.2.2 Definição de Nível 2: superficial

Levando-se em consideração os aspectos anteriormente discutidos, pode-se estabelecer uma definição de MP mais extensa, mas ainda incompleta, descrita por Kalay (2004, p. 499) como a prática de fazer os valores de vários atributos de um objeto dependente de parâmetros "em aberto", para que ele seja modificado mediante a alteração desses valores. Diferentemente, Hernandez (2006b, p. 40) considera essa situação como parametrização e não a modelagem em si. Esse autor descreve a primeira como o processo de designação de atributos paramétricos para um modelo geométrico (ou explícito) que irá determinar a forma como os componentes geométricos irão variar.

A diferença entre modelos implícitos ou paramétricos e modelos explícitos ou geométricos é dada por Burry e Murray (1997). Em maiores detalhes, na MP se representa os objetos de maneira implícita, ou seja, em função de parâmetros. Nesse caso, suas propriedades geométricas são descritas em relação a variáveis (ver Figura 26a) e caso queira modificá-lo, deve ser trocado os valores dessas variáveis. De modo diferente, os modelos geométricos representavam os objetos de maneira explícita, ou seja, de maneira absoluta. Nesse caso, o objeto era descrito em relação a valores numéricos constantes, como de suas dimensões (ver Figura 26b), e caso se quisesse modificá-lo, deveria ser editado manualmente pelo usuário (BURRY; MURRAY, 1997).

Figura 26 – (a) Modelo paramétrico ou implícito; (b) modelo geométrico ou explícito



Fonte: BURRY; MURRAY, 1997.

Esse método de modificar a forma através dos parâmetros iniciais se tornou possível com o uso do recurso de registro das operações (*history log*) procedente do sistema híbrido entre CSG e B-rep descrito no item anterior 2.2.1. Esse recurso podia apontar explicitamente os parâmetros iniciais dentro do seu histórico, os quais poderiam ser editados gráfica ou textualmente pelo usuário (EASTMAN, 1999, p. 44). Sempre que o usuário realiza uma alteração, o sistema paramétrico pode recriar automaticamente o modelo a qualquer momento, reavaliando esse registro e assim, mostrando a modificação (KRIPAC, 1995, p. 21), ao contrário dos modelos geométricos no qual o histórico das operações e parâmetros usados para gerar a forma não era retido.

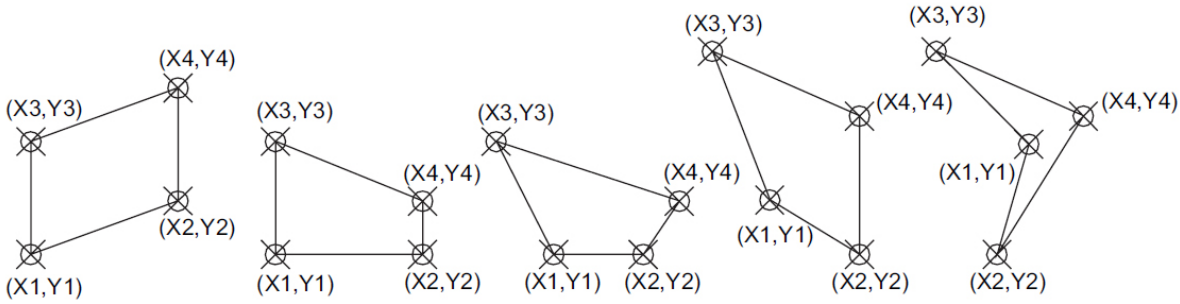
Para Hernandez (2006a, p. 310), "[...] o modelo paramétrico responde às mudanças, adaptando-se ou reconfigurando-se aos novos valores dos parâmetros, sem apagar ou redesenhar [...]". Essa afirmação é duvidosa, pois toda mudança na forma de um modelo paramétrico, ou não, ocasiona o "redesenho" de sua visualização na tela do computador. Por isso provavelmente o que esse autor deve estar querendo dizer é que esse processo acontece sem uma ação direta do usuário. Eastman e colaboradores (2011, p. 41) destacam que essa ação de ajuste automático do sistema paramétrico cria a sensação de que o modelo edita a si mesmo, que pode demonstrar que o nível de inteligência de um sistema paramétrico é maior do que um modelador geométrico.

Como visto, a modificação do modelo deve ser determinada pelos parâmetros, mas como existem variadas maneiras de se alterar uma forma, se torna necessário um conjunto de regras para orientar tal processo (SACKS; EASTMAN; LEE, 2004, p. 294), as *constraints* (regras de restrições), comentadas no item 2.2.1. As *constraints* determinam que a forma criada se

“comporte” como um objeto geométrico específico, onde o comportamento pode ser entendido como “[...] as ações automáticas do sistema que mantém a consistência topológica[63] e geométrica para as relações internas dos objetos do modelo.” (SACKS; EASTMAN; LEE, 2004, p. 294).

Para exemplificar tal situação, pode-se comparar dois modelos diferentes, um sem e outro com *constraints*, ambos pretendem gerar um retângulo. No primeiro, foi usado como parâmetro as coordenadas dos quatros vértices ligados por segmentos de reta. Com se vê na Figura 27, percebe-se que ao alterar suas coordenadas são formados quadriláteros, mas não retângulos, demonstrando que apenas os parâmetros são insuficientes.

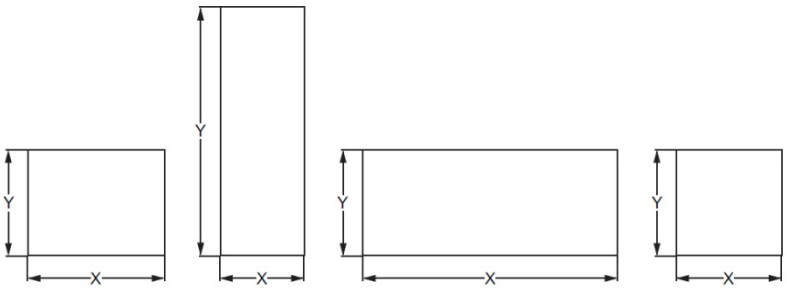
Figura 27 – Diferentes formas geométricas geradas pela variação das coordenadas



Fonte: HERNANDEZ, 2006a.

No segundo modelo, as *constraints* definem o comportamento da forma usando as regras de construção de um retângulo, no qual seus lados opostos devem ser paralelos entre si e os lados consecutivos devem se encontrar em um ângulo de 90º, usando como parâmetro (x e y) as dimensões de dois lados. Como se vê na Figura 28, as regras de restrições limitam o comportamento dessa forma para que ela se “comporte” como um retângulo ao se variar os valores de seus parâmetros.

Figura 28 – “Diferentes formas” geradas pela variação das dimensões dos lados



Fonte: HERNANDEZ, 2006a.

[63] Neste caso, o autor trata da topologia do modelo, não da geometria, que pode ser definida como o número de componentes e conexões entre eles que compõem um objeto (EASTMAN et al., 2011, p. 57).

Segundo Katz (2007), muitos modelos possuem *constraints*, tanto os geométricos quanto os paramétricos, a diferença é que no primeiro as regras não estão declaradas ao usuário e no segundo sim. Em outras palavras, no modelo paramétrico o registro (*history log*) guarda informações sobre as regras de construções do modelo e também são mantidas como uma parte integrante da geometria do modelo durante a edição (SACKS; EASTMAN; LEE, 2004, p. 294).

2.2.2.3 Definição de Nível 3: básica

Em vista das características apresentadas até aqui, pode-se refinar a definição de MP formulada, podendo esta ser entendida como o processo de geração de formas em função de um conjunto de parâmetros,[64] e de uma configuração de regras de restrições (HOFFMAN; JOAN-ARINYO, 2002, p. 519), que não só controlam a geração da forma, mas também o modo como esta pode ser modificada (KATZ, 2007), dentro de um sistema computacional que a cada alteração reconstrói automaticamente[65] a forma (SHAPIRO; VOSSLER, 1995, p. 51). Destaca-se que essa definição apresenta os requisitos mínimos para se identificar uma dada ferramenta como de modelagem paramétrica, apesar de atualmente as ferramentas de MP possuírem mais recursos.

Além disso, nessa definição nota-se o destaque dado a capacidade de edição e modificação da forma gerada, que é proveniente da motivação inicial da concepção dos programas paramétricos, a qual focava em atender a indústria de produtos que demandava um ambiente computacional com maior flexibilidade de manipulação de seus modelos. Em particular, essa facilidade de edição da forma visava ser uma "[...] solução para a reutilização de projetos existentes." (SHAH; MÄNTYLÄ *apud* LEE; SACKS; EASTMAN, 2006, p. 760). Visto que na maioria dos processos de criação e desenvolvimento de produtos, ou outras áreas de projeto, é comum revisar ou modificar características específicas de suas partes, ao mesmo tempo em que preserva outras características e mantém as essenciais. Logo, ao longo desse processo versões do mesmo projeto são criadas a partir de opções anteriores.

A MP possibilita essa reutilização de projetos mediante um método de criação de formas baseadas na ideia de tipologia, mas também aplicável a objetos únicos. Esse método se chama variação paramétrica, foi comentado no item 2.2.1, e é similar a criação de formas "padrão"

---

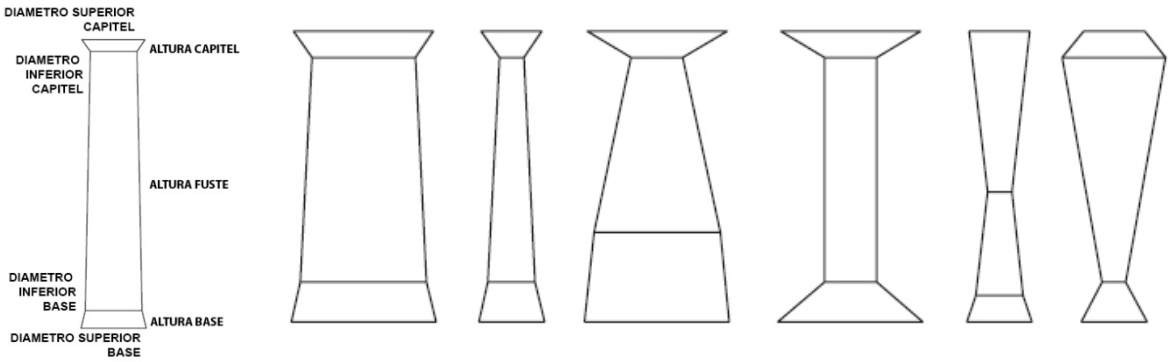
[64] A partir desse ponto, todo vez que se usar o termo parâmetro estará fazendo alusão ao parâmetro "em aberto" ou definido pelo usuário.

[65] A partir desse ponto, todo vez que se usar o termo automático para a atualização ou reconfiguração da forma do modelo, estará fazendo alusão a essa ação sem a intervenção do usuário.

nas ferramentas CAD não paramétricas que foi discutida no começo do item 2. Diferentemente desse caso, a MP permite o usuário crie seu próprio *template* (meta-modelo) de um objeto a partir da combinação dessas primitivas parametrizáveis (termo usado por AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 141), ou seja, ele pode definir tanto os parâmetros quanto as regras de restrições que mantém as relações de combinações entre os elementos. Uma vez criado esse meta-modelo, conforme Mitchell e Mccullough (1991, p. 117), a MP permite gerar uma gama de variações desse objeto mantendo sua forma essencial, ao modificar seus parâmetros. Também segundo esses autores, Hernandez (2006b) e Monedero (2000), cada versão desse objeto é chamada de instância, o conjunto dessas instâncias de família, e a ação de geração dos objetos de instanciamento. Na Figura 29 (a), apresenta-se o meta-modelo de uma coluna com os atributos geométricos que foram parametrizados e na Figura 29 (b) tem-se a família resultante após alterações dos valores de seus parâmetros.

Figura 29 – (a) Modelo paramétrico de uma coluna; (b) Família de colunas

(a) (b)



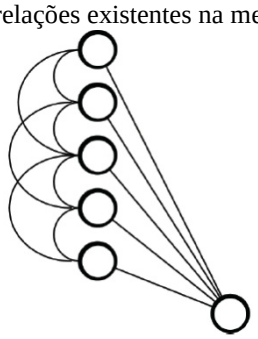
Fonte: HERNANDEZ, 2006a, p. 312.

Essa técnica de modelagem a partir da variação paramétrica se tornou possível com a pesquisa de Gossard e Light, juntamente com o trabalho de Gopin sobre a Teoria dos Grafos, citadas no item 2.2.1. Isso é possível, porque as regras de restrições controlam os limites de possibilidades de variação dos parâmetros. A primeira pesquisa possibilitou aumentar os tipos de variações paramétricas proporcionadas pelos modelos, uma vez que é a partir deles que o usuário pode definir as relações entre os elementos, usando propriedades geométricas mantidas no modelo pelas *constraints*.

A segunda pesquisa, é o resultado da evolução da técnica de implementação de modelos paramétricos em ambiente computacional, visto que um modelo paramétrico é construído computacionalmente sobre um banco de dados estendido (MONEDERO, 2000, p. 372). Esse banco de dados permite que os parâmetros e as *constraints* sejam registrados em uma meta-

estrutura (HOFFMAN; JOAN-ARINYO, 2002, p. 520) ou uma estrutura interna que identifica esses elementos em uma hierarquia (GROSS, 1990, p. 129), comumente em forma de grafo (EASTMAN *et al.*, 2011, p. 38). Nessa estrutura (Figura 30) os nós representam entidades e as linhas (conexões) representam as operações. A opção de alterar o modelo através desse grafo possibilita a criação de um comportamento bem definido do objeto (MONEDERO, 2000, p. 374).

Figura 30 – Grafo representando as relações existentes na meta-estrutura interna de um elemento



Fonte: WOODBURY; WILLIAMSON; BEESLEY, 2006.

2.2.2.4 Extrapolando Novas Funcionalidades a Definição Básica

Com o tempo, a definição e as funções de modelagem paramétrica foram ampliados e se tornaram mais elaborados (LEE; SACKS; EASTMAN, 2006, p. 760), ao se aprimorar constantemente os recursos existentes (*constraints*) e ao criar novos (*features*). No caso dos recursos existentes, pode-se destacar a ampliação na capacidade de estabelecer relações entre entidades geométricas quaisquer mediante as *constraints* definidas pelo usuário. Comumente, conforme Eastman e colaboradores (2011, p. 64), essa relação estabelece uma ligação da geometria ou de algum parâmetro de um objeto com os de outros objetos. Desse modo, podem-se encontrar três tipos de relações: interna (1), entre iguais (*peer*) (2) e de hierarquia (3).

A primeira (1) é comumente chamada de topologia do objeto ou do modelo, e trata das suas relações internas ou constituintes, discutida anteriormente nesse item. A segunda (2) é realizada entre dois elementos, onde qualquer das partes possui a mesma relevância, sendo assim, uma relação bidirecional. A última relação (3), define uma estrutura de organização entre vários elementos, ordenados em níveis de importância, estabelecendo relações de dependências entre eles, que repercutem nos níveis mais baixos, que herdam propriedades ou comportamentos dos níveis mais altos (GROSS, 1990, p. 129), geralmente, essas relações são representadas por um grafo. Um exemplo de relações de hierarquia são recursos de

alinhamento, que fornecem parâmetros de localização para os objetos no ambiente computacional, similarmente a malha estrutural usada para guiar o posicionamento de pilares durante o projeto. Comumente, esses recursos são visualizados como malhas, nas quais se alinham os objetos e cria-se uma relação de hierarquia entre eles, o resultado é que ao mudar a organização dessa malha, os objetos que estão associados a ela também se modificarão.

Essas relações dependem do tipo de regras de restrições possíveis de serem estabelecidas. De acordo com Hoffman e Joan-Arinyo (2002, p. 522), em questões de implementação computacional, as *constraint* podem ser classificadas nas seguintes classes: geométricas, equacionais, semânticas e topológicas. Na primeira, podem-se incluir relações espaciais entre elementos, como perpendicularidade ou paralelismo, relações de posição, como distância ou alinhamento, que de uma forma geral são maneiras de controle da forma. A segunda classe expressa as relações entre os parâmetros dimensionais e/ou as variáveis tecnológicas, tais como torque. A terceira define condições de validade em uma forma, ou seja, operações de lógica e controle de dados. Como por exemplo, a seleção de valores múltiplos (mais de um elemento ao mesmo tempo), operações de recursividade, relações de tolerância e criação de intervalos (GROSS, 1990, p. 132). A última classe, expressa as relações topológicas entre entidades de um modelo, como relações de vizinhança, conectividade e orientabilidade[66], que são importantes para operações de interseção entre objetos.

Todo esse processo, de ampliação das habilidades das *constraints*, desviou o foco da abordagem da modelagem paramétrica da definição de parâmetros para a imposição de *constraints* na forma dos objetos (KALAY apud LEE; SACKS; EASTMAN, 2006, p. 760). Tanto que para Woodbury, Williamson e Beesley (2006), a nova ideia criada pela MP é exatamente a capacidade de relacionar diferentes partes entre si e deferir para o sistema a tarefa de mantê-las dessa maneira. Monedero (2000, p. 371) chega a afirmar que a MP possui um nome equivocado, pois "implica a utilização de parâmetros para definir uma forma quando o que realmente está em jogo é a utilização de relações". Também, Burry (2003, p. 149) apoia que essa denominação é imprópria e que seria mais precisamente referida como geometria associativa, pelo menos na sua visão de usuário. Esse autor explica em maiores detalhes a geometria associativa, por intermédio de dois casos.

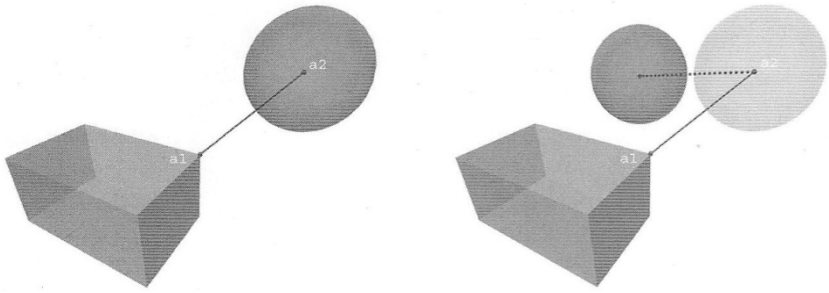
O primeiro demonstra a diferença para um projetista entre um modelo com ou sem geometria associativa. A Figura 31 (a) mostra o exemplo não-associativo, no qual há uma esfera e um

[66] Ver item 3.1, sobre Topologia.

prisma retangular no espaço. O centro da esfera está ligado a um canto do prisma retangular por uma linha. Ao se mover a esfera (Figura 31b), nota-se que os outros elementos permanecem sem alterações. Nessa situação, os elementos são independentes, ou seja, não há associações entre eles. A Figura 32 mostra o exemplo equivalente ao anterior, mas de maneira associativa, assim quando a esfera é movida, a linha também, uma vez que mantém a relação entre as duas geometrias.

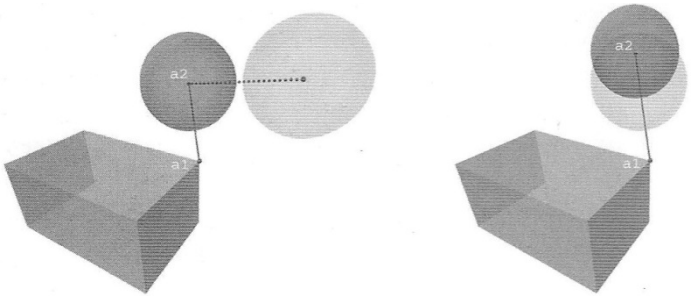
Figura 31 – Exemplo não associativo: (a) antes de mover a esfera; (b) depois de mover a esfera

(a) (b)



Fonte: BURRY, 2003, p. 150.

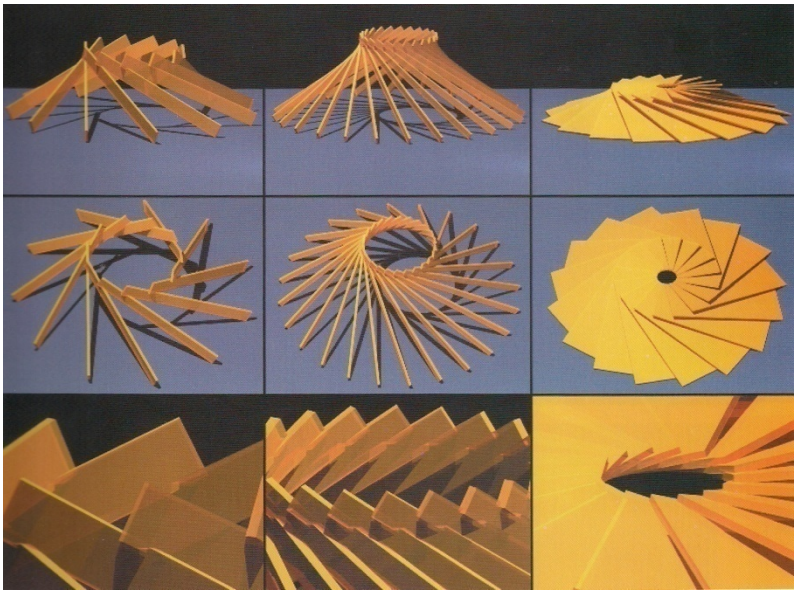
Figura 32 – Exemplo associativo: dois movimentos com a esfera e que a linha acompanha



Fonte: BURRY, 2003, p. 150.

Nota-se que não há relação direta entre a esfera e a caixa nesses exemplos, mas num exemplo mais complexo existem múltiplas relações, que serão apresentadas no segundo caso: a “treliça” de estrutura recíproca (Figura 33). Esse objeto é formado por uma sequência de perfis retangulares, conectados uns nos outros, segundo um determinado ângulo, sendo que cada perfil é suportado pelo da frente ao mesmo tempo em que suporta o de trás. Eles se encaixam no topo e formam um ângulo com o chão de tal maneira que geram a forma de um tronco de cone. Essa estrutura, apesar da forma aparentemente simples, é de difícil modelagem, devido à reciprocidade das relações (BURRY, 2003, p. 152). Mas, uma vez modelada, pode-se estudar varias alternativas de projeto dependendo dos parâmetros a serem modificados: altura da estrutura, diâmetro interno e externo, número e espessura de perfis.

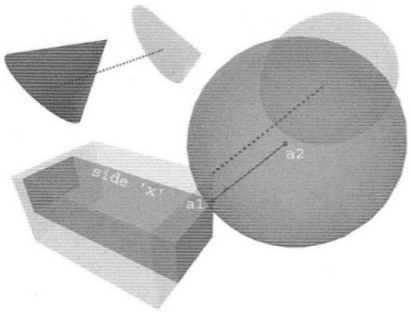
Figura 33 – Variações paramétricas da treliça de estrutura recíproca



Fonte: BURRY, 2003, p. 153.

Depois desses dois casos, Burry (2003, p. 150) ressalta que do primeiro para o segundo se percebe um crescimento da complexidade do objeto que se pode representar usando a geometria associativa, devido ao aumento do número de relações entre os elementos geométricos. Mais ainda, que essa complexidade continuará a crescer uma vez que se percebeu que não só as geometrias podem ser associadas, mas também as associações em si. Na Figura 34, esse autor apresenta um exemplo simplificado dessa afirmação. Nela tem-se um prisma retangular, uma esfera e um cone. O tamanho e posição do cone, o comprimento da linha que liga o prisma retangular à esfera e o tamanho da esfera são todos definidos em proporção ao comprimento do lado *x* do prisma retangular. Assim, quando se aumenta o lado do prisma retangular, tanto a linha quanto a esfera e o cone são modificados de acordo com essa proporção. Pode-se notar que o cone apesar de não estar visualmente conectado nos outros elementos geométricos, continua a ser influenciado por eles.

Figura 34 – Exemplo de associações entre relações



Fonte: BURRY, 2003, p. 150.

Como visto, essa ampliação das habilidades das *constraints* forneceu um gama de diferentes regras, as quais puderam ser incorporadas em um sistema paramétrico, e dependendo do tipo de regras utilizadas para defini-lo, tem-se como estabelecer a generalidade do sistema (EASTMAN et al., 2011, p. 38).

Essa generalidade diz respeito ao nível da semântica que o programa pode oferecer ao usuário, ou seja, em que medida um determinado programa de modelagem paramétrica é dedicado a conhecimentos de um domínio funcional específico. No caso ora em estudo, conhecimentos da área de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), isto é, o programa deverá incorporar atributos e comportamento para abordar considerações funcionais, tais como estrutural, conforto ambiental e acústico, propriedades dos materiais e etc. **(**SACKS; EASTMAN; LEE, 2004, p. 310).

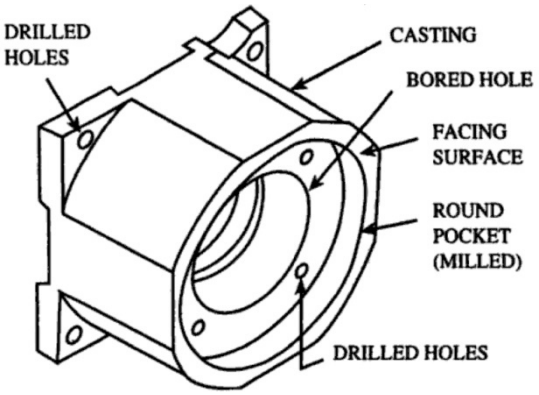
De uma forma geral, Aish (2003, p. 247) relata que dois tipos de ferramentas são mais usados no campo da AEC: por um lado, programas com baixo nível de semântica, e por outro lado programas com alto nível semântico pré-definido. O primeiro caso caracteriza ambientes computacionais nos quais são construídos modelos geométricos por meio de elementos abstratos como linhas, arcos, círculos e etc., que por sua vez representam a forma de objetos da área de AEC, mas não se comportam como eles. No segundo caso, se refere a ferramentas que constroem modelos mediante o uso de objetos inteligentes, ou seja, que se comportam como objetos da área da construção, por exemplo, paredes, janelas e portas. Para tanto, deve ser inserido nesse sistema as relações paramétricas, topológicas e as *constraints* entre as partes, de modo que elas se comportem de acordo com o contexto de projeto. Desse modo, a semântica do programa é pré-definida no meta-modelo.

Cada ferramenta é escolhida devido a suas particularidades. Essa segunda abordagem pode ser extremamente útil e produtiva para se trabalhar dentro de uma disciplina de projeto com convenções bem-estabelecidas, como é a AEC. Mas, há reservas de que aplicações CAD, que codificam essas convenções de projeto e de engenharia desta forma e não possuem definições abertas para alterações pelo usuário, poderiam ser vistas como uma força muito conservadora e limitadora para criação de novas opções de projeto (AISH, 2003, p. 247). Por outro lado, a primeira abordagem, por ser abstrata, permite à exploração de novas opções de projeto e o questionamento das convenções estabelecidas, trazendo mudanças a disciplina, tanto que há recomendações que a segunda abordagem possua ferramentas que suportem a fase de concepção do projeto por intermédio de objetos abstratos que mais a frente do processo de

projeto possam ser definidos como objetos inteligentes (SACKS; EASTMAN, LEE, 2004, p. 310).

Para atender a esses sistemas dedicados à área de construção, e viabilizar a modelagem paramétrica mediante objetos inteligentes, foi desenvolvido o recurso, inicialmente voltado para engenharia mecânica, denominado de *features*. De acordo com Monedero (2000, p. 375), do ponto de vista da fabricação (CAM), *features* é algo que pode ser extraído ou adicionado a um objeto, a partir de uma sequência particular de operações de uma máquina. Por exemplo, a Figura 35, mostra uma peça mecânica contendo diferentes tipos de *features*, como furos, chanfros, boleados e saliências.

Figura 35 – Exemplo de *features* de fabricação em uma peça



Fonte: SHAH; MÄNTYLÄ, 1995, p. 13.

Essa definição vem baseada no reconhecimento de que uma das principais utilizações das operações booleanas (adicionar ou subtrair) seria incorporar *features* em uma forma primária (EASTMAN et al., 2011, p. 36). Nesse sentido, parte do conceito de *features* é que ele somente existe em relação a outro objeto, ou seja, não pode ser criado sozinho, com se fosse uma forma “parcial” a ser embutida em um objeto principal. Para a área da AEC, um exemplo seria uma porta ou uma janela, pois elas só podem ser inseridas no modelo se houver paredes (objeto principal).

Uma definição mais geral, estabelece que *features* são entidades semanticamente significativas e distintas, e podem expressar tanto atributos geométricos quanto atributos não geométricos, tais como material construtivo (SACKS; EASTMAN; LEE, 2004, p. 304). Assim, o significado semântico que ele expressa é do domínio específico, neste caso, a área de AEC. Para completar o sentido a cima, Hoffman e Joan-Arinyo, (2002, p. 527) definem *features* como uma forma genérica com que os projetistas associam certas propriedades,

atributos e conhecimentos da área de AEC para auxiliar no processo de projeto, tanto a geração da forma, quando nas análises de desempenho.

Esse novo recurso se tornou possível devido às novas capacidades dos sistemas de suportar e gerenciar combinações complexas das relações de um modelo, geralmente apoiadas em grafos. Apesar da primeira pesquisa sobre *features* ter acontecido em 1976, no doutorado de Grayer, somente na metade dos anos 80 que se desenvolveu amplamente. Atualmente este conceito tornou-se importante para a modelagem paramétrica, sendo bem absorvido pela área de projeto de produtos (MONEDERO, 2000, p. 375).

2.2.2.5 Definição adotada na pesquisa

Depois de consultar diferentes definições sobre Modelagem Paramétrica, a autora dessa pesquisa estabeleceu que a definição mais atualizada e completa pertence a Lee, Sacks e Eastman (2006, p. 760), na qual eles enumeram as características que distinguem os sistemas de MP dos outros sistemas CAD existentes. Essa definição foi resumida como: O processo de modelagem no qual o usuário, mediante sua interface, pode construir e controlar o meta-modelo de um objeto (abrangendo a forma e o comportamento inteligente) através da parametrização de atributos (geométricos ou de outra natureza) e da configuração de *constraints* (incluindo *features*, geometria associativa e relações semânticas), ambos declarados ao usuário e mantidos automaticamente pelo sistema computacional baseado em modelagem sólida.

2.2.3 Vantagens e Limitações

À medida em que a MP é empregada nos diferentes ramos e etapas de projeto da área de AEC, surgem alguns benefícios que deverão ser ampliados e limitações que deverão ser ultrapassadas para que, cada vez mais, possa ser um recurso adaptado a esse domínio específico.

Um grande atrativo dessa ferramenta é a sua capacidade de gerar várias alternativas de projeto, como as variações paramétricas (HOFFMAN; JOAN-ARINYO, 2002, p. 519), em um menor espaço de tempo do que com as ferramentas não paramétricas (ver item 2.2.2). Segundo Aish e Woodbury (2005, p. 151), isso se dá, pois, a MP reduz o tempo e o esforço necessários para a mudança do projeto e reutilização de seus elementos. Além disto, não só aumentando a produtividade da projetação (SHAPIRO; VOSSLER, 1995, p. 51), mas também

um ganho de sua qualidade, visto que permite um processo iterativo de ajuste fino e contínuo do projeto (BURRY, 1996, p. 79).

Outro incentivo para o uso dessa ferramenta, é a sua capacidade de explorar diferentes configurações geométricas (FLORIO, 2009, p. 572), cada vez mais complexas. Uma vez que a MP possibilita o usuário um maior controle da forma, pois o mesmo pode criar e manipular relações paramétricas, transformações e *constraints* entre múltiplos elementos (MADKOUR; NEUMANN; ERHAN, 2009, p. 589). Mais ainda, essa habilidade pode ser expandida para proporcionar geração semi-automática de formas (AISH; WOODBURY, 2005, p. 151), similar à modelagem procedural[67] ou ao *Generative Design* [68].

Por outro lado, para alcançar tamanho controle geométrico, geralmente, é necessário aumentar o nível de rigor das etapas construtivas das formas, que por sua vez pode ser alcançada com uma aproximação do conteúdo matemático da descrição dos elementos geométricos pelo usuário (HERNANDEZ, 2006b, p. 322). Atualmente, como será mostrado no Capítulo 3, as definições matemáticas para descrever as formas em uma ferramenta de modelagem pertence às disciplinas da Matemática estudadas no nível superior do ensino, e que frequentemente são pouco estudadas pelos arquitetos. Somando a isso, o *history log* representa uma sequência de passos de construção do objeto, ou seja, traduz a intenção do projeto em algoritmos (BELESKY, 2010), a qual é uma representação procedural compatível com o pensamento lógico das linguagens de programação, comumente usadas como interface para que o usuário edite o *history log* (HOFFMAN; JOAN-ARINYO, 2002, p. 520).

Devido a ambos os casos, que para se alcançar um maior controle das formas geométricas é demandado do usuário um novo complexo de habilidade e conhecimento, como cálculo diferencial, equações paramétricas e noções de organização de fluxo de dados, pouco presentes nos currículos de Arquitetura (WOODBURY; WILLIAMSON; BEESLEY, 2006). Essa situação mostra o conflito com o processo tradicional de concepção formal, o qual usualmente há um grande nível de indeterminação e flexibilidade, que é mais intuitivo (BURRY, 1996, p. 79).

Outro fator desestimulante a adoção de ferramentas paramétricas na área de AEC é que seu produto possui um nível alto de complexidade de informações e quantidade de elementos. Ao se modelar tal produto, a quantidade de dados e parâmetros cresce exponencialmente. Mesmo

[67] Ver item 3.2.2.2.2, sobre Técnicas de Modelagem Avançadas.
[68] Ver item 2.1.5.

quando, no futuro, isso poderia ser enfrentado com poder computacional suficiente, a carga cognitiva que o projetista deve enfrentar pode ser opressiva. Além disso, o produto dessa complexidade, o risco de propagação de erros aumenta exponencialmente (LEE; SACKS; EASTMAN, 2006, p. 761; AISH; WOODBURY, 2005, p. 151). Isto causa um dos problemas mais comuns no uso de ferramentas MP: *over-constraint*, na qual o usuário define restrições em excesso de modo que impede o processo de regeneração automáticas do sistema (BURRY, 2003, p. 213).

Dado o exposto, fica a reflexão sobre essa situação: se é uma questão de adaptação dos usuários não familiarizados com a ferramenta MP, ou se é um problema inerente à sua própria constituição.

2.3 Considerações Gerais

Ao longo da evolução da tecnologia computacional aplicada ao projeto, diferentes técnicas de modelagens foram desenvolvidas, ampliando cada vez mais sua aplicabilidade para diversos campos do conhecimento. Durante esse período as ferramentas CAD possuíram diversas aplicações e finalidades para a Arquitetura, desde editores de desenho à simuladores de desempenho, o que influenciou os processos de projetação arquitetônica. Principalmente a partir do final da década de 1990, quando surgiu uma diversidade de propostas de paradigmas projetuais digitais, sob a designação de Arquitetura Digital. Permeando essas propostas, a Modelagem Paramétrica desempenha um papel importante, ao dar suporte à concepção e ao desenvolvimento do projeto de formas não convencionais pelo emprego de seus recursos, que facilitaram um maior controle matemático das representações, transformações e análises de geometrias complexas. Essas particularidades têm causado impacto na produção arquitetônica, que aos poucos, vem despontando novas formas ao longo da silhueta das cidades pelo mundo. Os conhecimentos geométricos nos quais se apóiam a construção dessas formas e como foram implementados em ferramentas de modelagem serão apresentadas no Capítulo 3, a seguir.

3 As Formas Curvas na Geometria e na Modelagem Geométrica

A produção da obra arquitetônica começa com seu projeto e termina com sua construção. Dentro da *práxis* profissional atual, a realização do projeto arquitetônico geralmente é um processo divido em etapas, desde a fase de concepção até o detalhamento executivo para sua construção. A fase de concepção do projeto, na qual o presente trabalho está inserido, envolve um amplo número de condicionantes às quais o arquiteto deverá contemplar na sua proposta, da qual faz parte a intenção plástica, ou seja, a forma da obra arquitetônica.

Essa forma é a característica mais visível da obra, no sentido de imediata apreensão visual pelo expectador, e corresponde a grande parte do trabalho da fase de concepção do projeto. Nessa construção formal, um grande número de arquitetos buscam definir a obra em um processo de aproximações sucessivas por meio de representações gráficas. Essa manipulação formal[69] se apoia, principalmente, nos conhecimentos da geometria[70]. Uma vez que é por intermédio da combinação dos variados elementos geométricos, que se pode determinar e construir os volumes que constituem a forma da obra arquitetônica (CLARK; PAUSE, 2005, p. 6).

Em vista desses aspectos, se julgou pertinente, neste Capítulo, tratar da base geométrica envolvida na criação e manipulação de objetos curvilíneos, de modo a permitir um melhor entendimento, não somente da natureza da geometria das formas dos edifícios a serem analisados no Capítulo 4, mas também de sua representação dentro dos programas de Modelagem Paramétrica. Para tanto, a apresentação do presente Capítulo será feita em dois momentos.

Primeiramente, pretende-se através de uma abordagem mais conceitual, delinear como o avanço no conhecimento da Geometria trouxe novas soluções para a criação de formas curvilíneas. Apontar-se-á também, quais áreas da Geometria oferecem mais recursos para a definição matemática de formas curvas e quais são os aspectos que corroboram para isso, seguindo posteriormente, do estudo de superfícies curvas abrangendo suas principais características e classes conhecidas. No segundo momento, adentrando o campo da computação, tratar-se-á de como esses conhecimentos da Geometria possibilitaram, ao serem

---

[69] Deve-se ressaltar que os métodos de representação gráfica não são os únicos a influenciarem a concepção formal de obras arquitetônicas, mas também os métodos construitivos possíveis de serem aplicados a elas.

[70] Não se afirma aqui que somente a capacidade de representação define a escolha da forma pelo arquiteto, neste ponto também as possibilidades de técnicas construtivas e a função também exercem um papel importante, como descrito no final do item 2.1.5. Porém nesse trabalho priorizou-se a questão da forma em detrimento da tectônica.

codificados dentro de computadores, novas definições de superfícies e novas técnicas de modelagem geométrica com seus métodos de transformação e geração de superfícies.

3.1 As Diferentes Geometrias para as Formas Curvas

A Geometria, como outras áreas do saber, sofreu o processo de desenvolvimento e aperfeiçoamento dos seus conhecimentos ao longo do tempo. Nessa evolução um desafio constante foi o estudo das linhas e superfícies curvilíneas. Essa pesquisa apenas nos últimos dois séculos recebeu atenção dedicada, ao contrário do período anterior, no qual ela se encontrava em segundo plano. Isso ocorreu devido as descobertas de novas teorias e a aplicação de novos instrumentos, que ajudaram não somente a criar uma compreensão mais precisa sobre as formas curvas, mas também ampliaram as suas possibilidades de emprego em outras áreas do conhecimento. Atualmente, é estudada por vários ramos da Geometria e se destaca entre as suas principais correntes de investigação (HOLME, 2002).

A evolução do estudo das formas curvas é apresentada resumidamente a seguir e focará nos avanços no conhecimento na Geometria que trouxe novas soluções para a criação dessas formas.

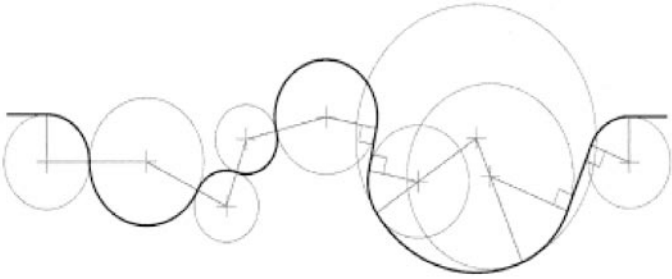
3.1.1 Da Antiguidade ao século XVII

O começo da Geometria, como ciência formalizada, pode ser associado a publicação do livro Os Elementos do matemático grego Euclides em 300 a.C. Nesse mesmo momento, também padronizou-se o conhecimento sobre as formas curvilíneas e já na sua origem foi considerado um trabalho complexo. Uma vez que na tradição euclidiana, segundo Holme (2002), a geometria era divida em duas subáreas, a Elementar (*Elementary*) e a Superior (*Higher*), sendo que a maioria das curvas se encontrava na segunda, com exceção do círculo. A Geometria Superior englobava os casos especiais das curvas cônicas (parábola, elipse e hipérbole) e de algumas curvas de segunda ordem (cissóide, concóide e espiral).

Nessa época, os trabalhos focavam a Geometria Elementar, considerando o círculo com seus derivados: arcos, cordas, raio e centro. Isso por que os instrumentos utilizados nas construções geométricas não podiam desenhar de uma única vez as curvas “superiores”, mas sim os círculos (HOLME, 2002, p. 136). Então, esses elementos do círculo se tornaram os elementos básicos para a construção de qualquer outro tipo de curva, como visto na Figura 36. Apesar das dificuldades, alguns matemáticos, como o grego Apolônio, estudavam algumas curvas do

grupo Superior. Ele produziu o primeiro corpo teórico inteiramente dedicado as curvas, que no caso dele eram as secções cônicas.

Figura 36 – Curva construída pela junção de arcos circulares



Fonte: LYNN, 1999, p. 21.

Na questão de superfícies e sólidos, naquela época, eram estudadas algumas superfícies de revolução, tais como cones, cilindros, alguns tipos de quádricas e até mesmo o torus (DIEUDONNE, 1972, p. 829).

Posteriormente a esse tempo, houve poucos avanços significativos no estudo das formas curvas por mais de mil anos. Isso somente mudou no século XVII, com a criação da Geometria Analítica pelos franceses René Descartes (1596-1650) e Pierre de Fermat (1601-1665). Essa nova área de estudo usou a notação algébrica[71], ou seja, equações para descrever as formas geométricas, em vez do desenho geométrico[72]. Para tanto, as formas geométricas foram conceituadas como um conjunto de pontos no espaço que satisfaziam certas equações e que estavam contidos num Sistema de Coordenadas Cartesianas[73], que por sua vez, permitiu a representação gráfica das curvas.

Das implicações dessa nova área de estudo, conforme Dieudonne (1972, p. 830), pode-se destacar a distinção formal entre as curvas que podem ou não ser descritas por equações, ao contrário da distinção entre poder ou não ser construídas por instrumentos de desenho geométrico. A descrição por equações guiará muitas das discussões sobre o tema até os tempos atuais. Além disso, a classificação das curvas de acordo com o grau da equação que a descreve, proporcionou a continuação dos estudos das curvas superiores ao segundo grau. Por fim, o uso do sistema de coordenadas se tornou a base para o entendimento contemporâneo da Matemática no Espaço (DAHAN-DALMEDICO, 2011, p. 12).

---

[71] Álgebra: ramo da Matemática em que as operações aritméticas e manipulações formais são aplicadas a símbolos abstratos (incógnitas) em vez de números específicos.

[72] Desenho geométrico é uma área da Geometria que se propõe a resolver graficamente problemas de natureza teórica e prática com o auxílio de instrumentos de desenho como a régua e o compasso. (PUTNOKI, 1993, p. 8).

[73] Método que atribui a cada ponto do espaço tridimensional uma tripla de coordenadas *(x, y ,z)* em relação a três eixos ortogonais e permite relacionar a geometria com a álgebra.

O método analítico mostrou a possibilidade do uso de outras áreas de análises da Matemática para estudar a Geometria e abriu o caminho para a criação do Cálculo Infinitesimal pelo alemão Gottfried Leibniz (1646-1716) e pelo inglês Isaac Newton (1643-1727) durante o final do século XVII, e de sua aplicação à Geometria com a criação da Geometria Diferencial, principalmente por Gaspard Monge (1746-1818) no século XVIII (EVES, 1969, p. 377). Esse acontecimento marcou uma reviravolta nos conceitos da época e serão descritos a baixo.

3.1.2 O Cálculo Infinitesimal e a Geometria Diferencial

Segundo Eves (1969, p. 350), o Cálculo Infinitesimal foi uma das ferramentas matemáticas mais aplicadas e estudadas no século XVII. Isso por que, essa disciplina possui uma ampla aplicabilidade, desde os diferentes ramos da Matemática, à Economia e à Física, entre outros. Assim, logo após sua origem, passou-se grande parte do século XVIII aplicando os novos métodos do cálculo a diversas áreas do conhecimento.

Numa visão geral, pode-se dizer que o Cálculo Infinitesimal "[...] analisa aspectos de mudança em processos ou sistemas [...]" (WOLFF, 2006, p. 312), ou seja, estuda a taxa de variação, total ou parcial, das quantidades de um processo. Para tanto, usa o artifício de dividir esse processo irregular a sua infinitésima parte, analisando cada parte separadamente e depois somando todos os resultados. Nesse caso, cada subdivisão possui uma escala tão pequena que a variação se torna desprezível, assim possibilitando o uso das ferramentas da álgebra e geometria (como o cálculo da área), que são próprias para processos regulares. Por exemplo, quando se tem uma curva e a dividimos em sua infinitésima parte, cada subdivisão se aproximará de uma reta. Da mesma maneira que para um habitante do planeta Terra, ele aparenta ser plano, apesar de ser redondo.

Das implicações dessa nova disciplina na Geometria, pode-se destacar a análise de gráficos curvos da geometria analítica para extrair suas propriedades, como os pontos máximos e mínimos. Além disso, esse ramo criou métodos de estimativas de solução de equações através de um processo de gradual refinamento (WOLFF, 2006, p. 952). Isso possibilitou não apenas a reconstituição de uma função, bastando para tanto conhecer apenas algumas das suas abscissas e respectivas ordenadas, mas também a aproximação de funções complexas por funções mais simples (WOLFF, 2006, p. 1118). Uma vez que equações de segundo grau são curvas, esse método permitiu criar processos de definição de curvas na Computação Gráfica chamados de interpolação e aproximação, que serão vistos no item 3.2.1.

Mais importante ainda, foi o trabalho de Newton em 1736, que criou um novo conceito de curva, ali definida como gerada pelo movimento contínuo de um ponto no espaço. Assim, inserindo a idéia de tempo na Geometria. Nessa época, esse conceito era representado como o aumento contínuo de alguma quantidade, por exemplo, algum valor na abscissa (EVES, 1969, p. 334). Apesar de não mencionar nenhum conceito de vetores, Newton trata em seus trabalhos de propriedades do que são agora consideradas entidades vetoriais, assim abrindo caminho para o seu desenvolvimento.

Esse ponto marcou o começo de uma reviravolta de conceitos na Geometria, que a partir daquele momento usa o movimento para definir seus elementos. Isso incentivou a origem do pensamento sobre a criação de modelos matemáticos, começando com fenômenos dinâmicos, como hidráulica e do estudo dos fluxos (PICON, 2011, p. 33).

O resultado da utilização do Cálculo na Geometria por Newton foi, não apenas, o refinamento de conhecimentos anteriores sobre as curvas, como a tangente, mas também a criação de novos conceitos. Dentre eles, comprimentos de arcos, pontos de inflexão, evoluta, involuta, plano osculador e, principalmente, a curvatura[74] para curvas planas (EVES, 1969, p. 335). Esse último conceito é o primeiro de uma série de tipos de curvatura que foram evoluindo até a atualidade e se tornaram o centro das pesquisas de formas curvas. Por trás disso tudo está o método de parametrização de curvas por comprimento de arco, que se tornará um dos métodos mais comuns para estudar curvas (DIEUDONNE, 1972, p. 830).

Progressivamente, as teorias criadas para curvas foram sendo aplicadas e adaptadas para as superfícies, durante o século XVIII e até o início do século XIX. Dentro dessa faixa de tempo tem-se a criação da Geometria Diferencial, mais precisamente entre a criação da definição de curvatura por Newton até a criação da definição de torção para curvas espaciais por Monge em 1775, mas foi esse último matemático que foi considerado o maior expoente dessa disciplina, por ter ultrapassado as questões planas (GORODSKI, 2002, p. 63; EVES, 1969, p. 364).

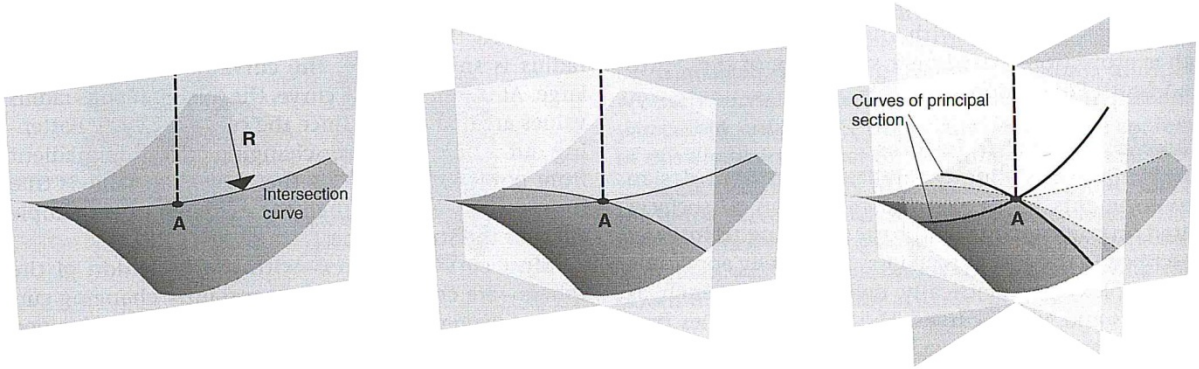
A Geometria Diferencial dessa época englobava o estudo das propriedades das curvas e superfícies no espaço euclidiano através da aplicação do Cálculo. Nela se estudavam as propriedades locais, isto é, aquelas que dependem somente do comportamento da curva ou superfície na vizinhança de um ponto. Por isso é usual chamar-lhe Teoria Local de Curvas e

[74] A curvatura de uma curva plana em um ponto da curva é uma medida numérica de quanto a curva se afasta de ser uma reta numa vizinhança daquele ponto: é a taxa de variação naquele ponto da direção tangente à curva em relação ao comprimento de arco (GORODSKI, 2002, p. 62).

de Superfícies (HILBERT; COHN-VOSSEN, 1990, p. 171). Essa disciplina foi a primeira a criar um corpo teórico de análises para curvas espaciais e superfícies. No primeiro caso, no estudo das curvas, destacam-se os conceitos de Torção e das Fórmulas de Serret-Frenet. A Torção[75] (τ) é a evolução do conceito de curvatura de Newton (k) aplicada ao espaço tridimensional, assim compreendendo as curvas espaciais. Em 1826, as Fórmulas de Serret-Frenet foram refinadas por Augustin Louis Cauchy (1789-1857) e expressavam o "[...] comportamento local da curva em função de k e τ em relação a um sistema de coordenadas móvel[76] [...]" (GORODSKI, 2002, p. 65).

No segundo caso, o estudo das superfícies começou com a contribuição de Leonhard Euler (1707-1783) com os conceitos de curvatura principal (Figura 37) em 1760 e superfície regrada em 1772. A curvatura principal é formada pela máxima e mínima seção normal de uma superfície, de modo a calcular a curvatura máxima e mínima num ponto de uma superfície regular. A superfície regrada foi determinada como aquela que pode ser desenvolvida isometricamente (isto é, sem distorcê-la) sobre um plano (COOLIDGE, 1940, p. 330).

Figura 37 – Curvatura principal



Fonte: SCHODEK et al., 2005, p. 196.

Mais importante ainda para o estudo das superfícies, foi o trabalho de Carl Friedrich Gauss (1777-1855) chamado de Investigações Gerais Sobre Superfícies Curvas, em 1827. Nele os conceitos criados foram baseados na representação paramétrica de coordenadas curvilíneas u e v, que dividem uma determinada superfície em curvas geodésicas[77] em duas direções ortogonais entre si (KOLMOGOROV; IUSHKEVICH, 1998, p. 236). Essa representação é

[75] A torção em um ponto de uma curva mergulhada no espaço é uma medida numérica de quanto a curva se afasta de estar contida em um plano numa vizinhança daquele ponto; as curvas espaciais que estão contidas em um plano, ditas curvas planas, são caracterizadas por terem torção nula (GORODSKI, 2002, p. 63).

[76] Esse é essencialmente o "triedro móvel" introduzido por Gaston Darboux (1842-1917) mais tarde em 1872, que substitui o sistema Cartesiano de eixos fixos por um sistema de eixos que acompanha a curva (GORODSKI, 2002, p. 65).

[77] Dado dois pontos sobre uma superfície, a geodésica é definida como o caminho mais curto na superfície ligando-os (HILBERT; COHN-VOSSEN, 1990, p. 220).

uma generalização da usada por Newton para as curvas planas e foi considerado um notável passo de Gauss, ter usá-la de uma forma sistemática como uma linha de abordagem da teoria de superfície (COOLIDGE, 1940, p. 355).

Desse trabalho, destaca-se o conceito de curvatura total (hoje chamada de curvatura gaussiana), que foi uma nova medida de curvatura para superfícies e que pode ser determinada pelo produto das curvaturas principais de Euler em um ponto (COOLIDGE, 1940, p. 357). Mediante essa curvatura pode-se classificar as superfícies da seguinte maneira: para curvatura gaussiana positiva é chamada de superfície sinclástica, com exemplo da esfera. Para curvatura nula é chamada de superfície plana, com exemplo o cilindro. E por fim para curvatura negativa é chamada de anticlástica, com exemplo o parabolóide hiperbólico (SCHODEK et al., 2005, p. 196).

Das implicações da Geometria Diferencial, pode se destacar a tendência na Matemática a partir dessa época no sentido da generalização[78] do seu conhecimento, que no seu caso específico gerou a Teoria Local de Curvas e de Superfícies. Por outro lado, num aspecto mais prático desse ponto, o termo ***linha*** foi substituído por ***curva***, como elemento unidimensional mais generalizado no qual a reta é um caso especial. Assim, pode-se dizer que, a partir desse momento, o estudo das curvas tomou a frente das pesquisas em Geometria.

Outro resultado desse ramo da geometria foi o começo dos estudos da geometria intrínseca, que tem como objetivo, estabelecer uma relação matemática, não entre os elementos de uma figura e um referencial externo (como o espaço euclidiano), mas entre os diferentes elementos da figura em si (COOLIDGE, 1940, p. 343). Em outras palavras, a geometria intrínseca tem a ver com as propriedades geométricas que podem ser detectadas por meio de medições ao longo da superfície, sem considerar o espaço em torno dela. Gauss deu o pontapé inicial a essa pesquisa mediante o *teorema egregium* que provou que sua curvatura era invariante sobre transformações isométricas e, logo, uma propriedade inerente da superfície (GORODSKI, 2002, p. 66).

Mais importante ainda foi que esse estudo de Geometria intrínseca abriu caminho para um debate mais conceitual e profundo dos fundamentos da Geometria. Isso porque, uma vez determinado um conjunto de propriedades em uma superfície, esses atributos poderiam ser definidos como a estrutura e comportamento de um espaço e, portanto essa superfície poderia

[78] Generalização é o processo de encontrar e destacar as propriedades de toda uma classe de objetos semelhantes mediante uma declaração sobre os conceitos, isto é, um teorema (MITCHELMORE, 2002).

ser considerada um espaço em si. Assim, teoricamente seria admissível criar uma Geometria, no sentido amplo da palavra, específica dessa superfície e que acima de tudo poderia ou não ser Euclidiana (KLINE, 1990, p. 882-887). Essa situação associado ao esforço histórico de provar o postulado das retas paralelas de Euclides culminou na reviravolta conceitual do século XIX: as Geometrias não-Euclidianas.

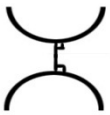
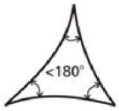
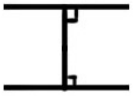
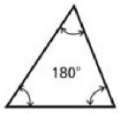
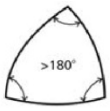
3.1.3 As Geometrias não-Euclidianas

As Geometrias não-Euclidianas são, sobretudo, produtos das pesquisas presentes desde os primórdios da Geometria e que buscavam esclarecer dúvidas e mostrar provas matemáticas do quinto postulado de Euclides. No início do século XIX, trabalhando de forma independente, Nikolai Ivanovich Lobachevski (1793-1856) e János Bolyai (1802-1860) chegaram à conclusão que era possível criar geometrias consistentes nas quais o postulado das paralelas de Euclides não era mais verdadeiro. Em 1854, Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866) criou uma geometria consistente com características diferente dos autores anteriores, mas que também negava esse postulado euclidiano. As descobertas desses três matemáticos marcaram a origem das Geometrias não-Euclidianas, que ficaram definidas como geometrias baseadas num sistema axiomático distinto da geometria euclidiana.

Para tanto, eles abordaram o assunto através da negação da unicidade do quinto postulado, considerando três possibilidades: por um ponto qualquer fora de uma reta dada, existe mais de uma, ou apenas uma, ou nenhuma linha paralela a reta dada (EVES, 1969, p. 126). No primeiro caso, tem-se a Geometria de Lobachevski-Bolyai. No segundo caso, a Geometria Euclidiana e, no terceiro, a Geometria de Riemann.

De modo análogo, outra abordagem é a soma das medidas dos ângulos internos de um triângulo contido no espaço, também com três possibilidades e seguindo a ordem a cima: menor que 180° para a de Lobachevski-Bolyai, igual à que 180° para a Euclidiana e maior que 180° para a de Riemann. Por fim, pode-se aplicar a curvatura gaussiana (k) ao analisar os resultados alcançados por esses matemáticos e descobrir que essas geometrias possuem curvatura constantemente: negativa para a geometria de Lobachevski-Bolyai, nula para a Euclidiana e positiva para a de Riemann. Essa informações estão resumidas no Quadro 2, a baixo.

Quadro 2 – Síntese comparativa entre as Geometrias Hiperbólica, Euclidiana e Elíptica

Autor	Nome	Curvatura gaussiana (k)	Soma dos ângulos do triangulo (Σ)	Postulado de Euclides
Lobachevski Bolyai	Hiperbólica	$k<0$ 	$\Sigma<180°$ 	Paralelas > 1
Euclides	Parabólica	$K=0$ 	$\Sigma=180°$ 	Paralelas = 1
Riemann	Elíptica ou Esférica	$k>0$	$\Sigma>180°$ 	Paralelas = 0

Fonte: própria autora

Apesar dessa descoberta houve muita resistência a essa hipótese que foi aceita pelos matemáticos lentamente ao longo de quarenta anos. Embora eles terem provado teoremas e não obtiveram contradição evidente, a possibilidade permaneceu aberta (SMITH, 2008, p. 52) até a segunda metade do século XIX, quando Eugenio Beltrami (1835-1900), Felix Christian Klein (1849-1925) e Jules Henri Poincaré (1854-1912) demonstram a consistência desta nova geometria pelo método dos modelos. Tal procedimento cria um modelo de geometria euclidiana para que o desenvolvimento abstrato da hipótese da soma dos ângulos internos do triângulo pudesse ser dada uma interpretação concreta em uma parte do espaço euclidiano. Então, qualquer inconsistência na geometria não-euclidiana implicaria uma incoerência correspondente na geometria euclidiana (EVES, 1969, p. 127).

Mais tarde, Klein reorganizou o corpo teórico dessas geometrias designando seus novos nomes. A geometria de Lobachevski-Bolyai recebeu o nome de Hiperbólica, a de Euclides de Parabólica e a de Riemann de Elíptica. A razão para estes nomes vem do programa de Klein de classificação de geometria de acordo com os grupos de transformações (que serão mostrados mais a frente), deixando suas propriedades geométricas inalteradas ou invariantes (HOLME, 2002, p. 196).

A origem das Geometria não-Euclidianas foi um evento significativo não só para o ramo da Geometria, como também para todo o campo da Matemática. Suas implicações começaram com o término da convicção histórica de que somente uma geometria era possível de existir e, por isso, que a Geometria Euclidiana era a idealização correta das propriedades do espaço físico (EVES, 1969, p. 365; KLINE, 1990, p. 861). Com a queda do quinto postulado de

Euclides, os axiomas e postulados passaram a ser considerados como meras hipóteses cuja veracidade ou falsidade física não lhes dizia respeito e que eram apenas a base de um sistema teórico. Assim, tornou-se evidente não só que a Geometria não está necessariamente ligada ao espaço físico real, mas também que ela poderia suplantar sua posição de instrumento de compreensão da realidade física, para se tornar uma ferramenta para a sistematização de idéias abstratas.

Por outro lado, instituiu-se que os matemáticos podiam estabelecer novos postulados desde que houvesse uma consistência entre eles, o que abiu caminho para a criação de diferentes sistemas de geometria "artificiais" do final do século XIX ao começo do século XX (EVES, 1969, p. 365). Entre elas, pode se destacar a Geometria de Riemann, a Topologia, a Geometria Fractal e as classes de Geometria de Klein. Todas introduziram novos conceitos de espaços abstratos, como por exemplo, a variedade multidimensional, a Teoria Geral da Dimensão e o estudo dos espaços métricos que mais tarde possibilitou o desenvolvimento da Teoria Geral da Relatividade. À baixo será explorado em maiores detalhes algumas dessas geometrias.

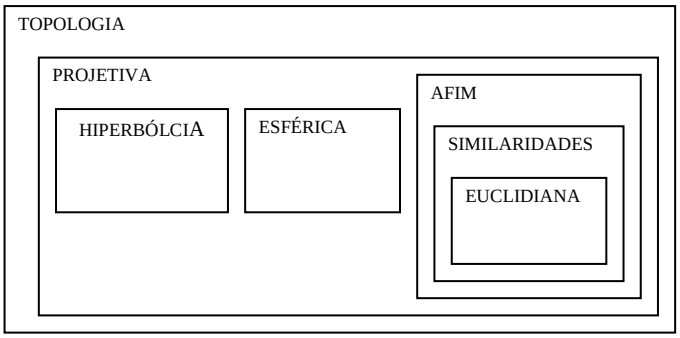
3.1.4 As classes de geometria de Felix Klein

No final do século XIX, houve o crescimento e a diversificação de sistemas de geometria que aparentemente não eram relacionados. Para contornar tal situação, em 1872, o matemático alemão Felix Klein apresentou seu Programa de Erlangen, no qual propôs um ponto de vista de que essas ramificações poderiam ser organizadas em um sistema (BURTON, 2006, p. 599). Essa abordagem usou a teoria dos grupos para classificar e unificar as principais geometrias existentes até então, mas sem alterar seus conceitos, axiomas e teoremas (COXETER; GREITZER, 1967, p. 80). A premissa de Klein define uma geometria como o exame das propriedades das figuras que se mantêm inalteradas quando elas são sujeitas a um grupo de transformações (EVES, 1969, p. 258).

Como consequência cada classificação dos grupos de transformação tornou-se uma codificação para uma ou mais geometrias (EMMER, 2005, p. 77) e ambas estão relacionadas entre si. Uma vez que, como na teoria da Matemática, as transformações podem definir casos especiais ou gerais. Ao aplicar a teoria dos grupos, pode-se afirmar que os casos especiais (são subgrupos) estão contidos nos casos gerais (grupo). De forma análoga, as geometrias correspondentes a essas transformações podem ser organizadas em grupos que estão contidos um nos outros. Essas relações entre as geometrias foram estabelecidas por Klein, que estabeleceu as geometrias não euclidianas como casos especiais da geometria projetiva

(COLLETTE, 1985, p. 490). Na Figura 38 pode-se visualizar um esquema com as relações de algumas das geometrias mais conhecidas.

Figura 38 – Relação entre as classes de geometrias de Klein



Fonte: própria autora

Em maiores detalhes, segundo Eves (1969, p. 258), na Geometria Euclidiana são estudadas as propriedades invariantes sob o conjunto de transformações isométricas que preservam as propriedades métricas, exemplos de operações são as rotações e as translações. Na Geometria de Similaridades, além das operações anteriores são permitidas as transformações homotéticas que podem preservam ou o paralelismo, ou a perpendicularidade, ou a semelhança de figuras. Tem-se, por exemplo, a dilatação isotrópica. Na Geometria Afim além das operações anteriores de ambas as geometrias são permitidas as transformações lineares que preserva a colinearidade, isto é, mantém os pontos sobre a mesma reta. Tem-se, por exemplo, a operação *Stretch*. Na Geometria Projetiva além das operações das três geometrias anteriores são permitidas transformações que preservem os alinhamentos e a razão dupla. Tem-se, por exemplo, as operações de projeção em perspectiva. Por fim, a Topologia como a geometria mais geral permite as transformações não lineares, mas contínuas, como por exemplo, as deformações (KLINE, 1990, p. 919-921).

Em suma, o conceito de transformação desempenhou um papel coordenador e simplificador no estudo da Geometria, que era necessário naquele momento. Sua classificação ainda é útil atualmente, pois muitas geometrias podem ser encaixadas por esse método, mas pouco antes do desenvolvimento da Teoria da Relatividade, em 1916, outras geometrias apareceram que não podiam ser encaixadas, como a Geometria Algébrica, que gerou novas pesquisas nessa área (EVES, 1969, p. 259).

3.1.5 Fractal

A Geometria Fractal foi consolidada em 1975 por Benoît Mandelbrot (1924-2010) e tem o nome derivado da palavra *fractus* ou do seu adjetivo *frangere* em latim, que significa quebrar.

Isso porque essa geometria trata de objetos geométricos que mostram um alto grau de irregularidade mesmo a níveis infinitamente pequenos. E, por isso, impossibilitava o usa dos conceitos de geometria euclidiana no estudo de suas (GOMES; VELHO, 1990, p. 161). Tais objetos possuem algumas características em comum, das quais se destacam três: auto-semelhança, complexidade infinita e dimensionalidade fracionária. A primeira, a auto-semelhança, é a repetição recursiva de padrões geométricos cada vez em escala menor (GOMES; VELHO, 1990, p. 163). Por exemplo, uma figura possui essa propriedade se apresentar o mesmo aspecto visual a qualquer escala que seja ampliada ou reduzida, ou seja, se parte de uma figura se assemelha a figura vista como um todo. A segunda característica, complexidade infinita, é resultado da primeira e pode ser definida como a incapacidade de representar todos os detalhes de um objeto fractal a níveis infinitamente pequenos, uma vez que, sempre existirão reentrâncias e saliências cada vez menores. A última, dimensionalidade fracionária, é que o grau de ocupação no espaço de um fractal é fracionário, ou seja, não é um número inteiro. Por exemplo, a curva de Koch (Figura 39) com seu comprimento infinito é mais do que unidimensional, mas sem ser bidimensional. Esse conceito está baseado na definição de dimensão apresentada em 1919 por Felix Hausdorff (AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 160), mas não será detalhado no presente trabalho.

Figura 39 – Sequência de construção da Curva Koch

Fonte: AZEVEDO, CONCI; 2003, p. 163.

De uma forma geral, objetos estudados são subconjuntos gerados por transformações geométricas simples (como a rotação e a translação) do próprio objeto nele mesmo. Apesar disso são capazes de gerar formas de alta complexidade como as encontradas na natureza, à exemplo das nuvens, das folhagens das plantas, dos flocos de neve, entre outros.

A aplicação dos fractais é cada vez maior, principalmente pela sua associação com os sistemas dinâmicos e caóticos. Além disso, é usada na modelagem procedural no campo de Computação Gráfica e será apresentado mas a frente no item sobre Técnicas de Modelagem Avançadas.

Por fim, vale destacar que é um ramo muito recente da Matemática, no qual sua própria definição e estrutura axiomática não estão completamente resolvidas (GOMES; VELHO, 1990, p. 163).

3.1.6 Topologia

A Topologia em sua forma moderna de ramo da Matemática foi inventada próximo ao final do século XIX pelo francês Henri Poincaré, como uma conseqüência de suas tentativas de classificar objetos geométricos que aparecem em análises matemáticas. Esse matemático consolidou os problemas topológicos em 1895 no artigo intitulado *Analysis Situs*, que era o antigo nome da Topologia e em latim significa análise de posição (LEE, 2000, p. 4). Outro nome recebido pela disciplina foi "geometria da posição" por Gottfried Leibniz, mas foi Johann Benedict Listing (1802-1882) que cunhou o termo topologia, na qual *logos* significa estudo e *topos*, lugar (SPERLING, 2008, p. 28).

Poincaré definiu a Topologia como o estudo das características qualitativas da Geometria (EMMER, 2005, p. 77), ao invés de uma abordagem quantitativa, ou seja, sem considerar os problemas de medidas ou quantidades que são constantemente trabalhados na Geometria Euclidiana. Por isso, essa disciplina estuda "[...] características modais dos objetos, ou das leis de conexão, de posições relativas e de sucessão de pontos, linhas, superfícies, corpos e suas partes, ou agregados no espaço [...]" (LISTING apud O'CONNOR; ROBERTSON, 2000). Em outras palavras, analisa como nas configurações geométricas seus objetos estão intrinsecamente conectados entre si (HILBERT, 1990, p. 289).

Para alcançar tal objetivo, estuda as "[...] relações espaciais constantes, cuja invariância se manifesta apesar de transformações formais e deformações [...]" (ABASCAL; ABASCAL BILBAO, 2011). Em uma linguagem matemática moderna, apoiada em Felix Klein que caracterizou as geometrias através da relação de congruência entre os seus objetos, a Topologia é a Geometria cuja relação de equivalência entre os objetos é dada pelas transformações contínuas reversíveis, isto é, homeomorfismos (MARAR, 2004, p. 4). Assim, para definir essas relações deve-se destacar dois conceitos, por um lado a deformação (também chamada de transformação contínua) e pelo outro as características invariantes (ou seja, propriedades topológicas).

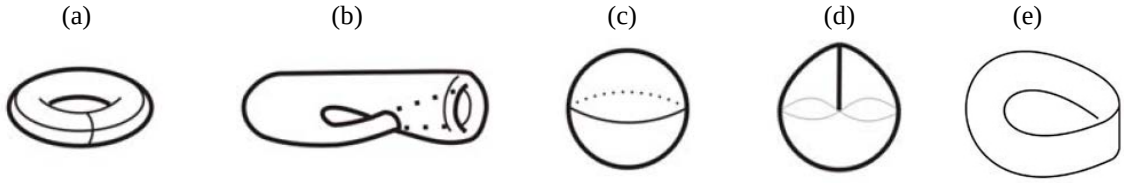
O processo de deformação é uma transformação geométrica contínua, ou seja, é uma operação matemática de correspondência em que cada elemento de um grupo seja correlato a outro elemento no outro grupo (COOLIDGE, 1940, p. 268). Nessa situação o primeiro grupo é a forma original e o segundo é ela após a transformação. O importante é que durante essa transformação os pontos que eram próximos no início se mantêm próximos no final, quer dizer, as relações de vizinhança não devem se alterar. O efeito visual é que os objetos na

topologia podem ser considerados como feitos de um material perfeitamente deformável (MARAR, 2004, p. 4) que são normalmente representados por meio de materiais físicos elásticos como pedaços de borracha. Dessa maneira, permite que se estique, que se encolha, que se torça, que se corte, torça e cole novamente no mesmo sentido do corte esses objetos. Por isso a Topologia é conhecida como a "Geometria da Borracha".

Existem várias características invariantes dos objetos geométricos na Topologia, como por exemplo: a conectividade por caminhos, a compacidade (ser compacto), a proximidade, a continuidade, ser aberto ou fechado, ter limite ou não, a orientabilidade e o *genus*. Algumas delas possuem definições bem aproximadas com as geométricas, como uma superfície ser aberta ou fechada[79], mas a maioria fica distante do alcance da intuição geométrica e por isso não serão discutidas nesse trabalho. O importante dessas características é que elas possibilitaram uma melhor definição quanto a relações espaciais de vizinhança, de separação, de ordem, e de continuidade (LEIVAS, 2008, p. 62).

Além disso, essas propriedades topológicas auxiliam a classificação de superfícies através das análises de suas congruências e similaridades. Essa classificação ocupa grande parte das pesquisas em Topologia, pois ajudam na identificação das superfícies básicas que ao sofrerem a aplicação das deformações dão origem as outras classes de superfícies (SPERLING, 2003, p. 138). Essas superfícies básicas são o Toro, a Garrafa de Klein a Esfera, Plano Projetivo e a Fita de Möebius (Figura 40).

Figura 40 – (a) Toro; (b) Garrafa de Klein; (c) Esfera; (d) Plano Projetivo; (e) Fita de Möebius



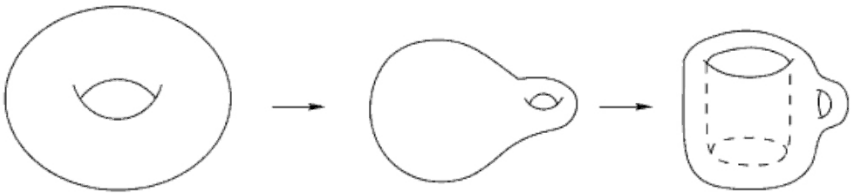
Fonte: (a) à (d): SPERLING, 2003, p. 149. (e) SPERLING, 2001.

Um dos primeiros exemplos registrados das operações da topologia é o artigo Sete Pontes de Konigsberg de Leonard Euler em 1736, que abordava uma prova matemática sobre se era ou não possível caminhar através da cidade e passar somente uma vez em cada uma das sete pontes. Este é um problema topológico porque explora a utilização do espaço e as propriedades de uma certa configuração geométrica que poderia ser deformada, tanto quanto necessário em papel, mantendo as mesmas características de ter sete pontes.

[79] Superfície fechada é aquela que envolve integralmente um espaço tridimensional finito (RABELLO, 2011, p. 14), sendo as superficies abertas as que não são fechadas. Ver também item 3.1.7.

Atualmente, um exemplo bem conhecido de uma operação topológica é deformar um Toro para obter uma caneca de uma alça (Figura 41). Tal problema é resolvido se por um lado se esticar uma metade do Toro para virar a caneca e por outro lado encolher a outra metade para se tornar a alça.

Figura 41 – Sequência da deformação do Toro em uma caneca



Fonte: LEE, 2000, p. 4.

A topologia é, em muitos aspectos, um termo genérico para diversas áreas da teoria Matemática que tratam de formas concretas e estruturas, uma vez que ela assumiu o papel de fornecer as bases para a maioria dos ramos da Matemática que tem alguma utilidade para um conceito de espaço (LEE, 2000, p. 4). Por isso, o ramo da Topologia não só pode ser divido em várias subáreas, como Topologia Algébrica (que inclui Topologia Combinatória), a Topologia Diferencial, e Baixo-dimensional Topologia (a geométrica). Além disso, a Topologia possui uma gama de aplicações em diferentes áreas como na Logística, na Física (a curvatura do espaço-tempo e a Teoria das Cordas), na Teoria dos Grafos, entre outras.

3.1.7 Superfícies Curvilíneas

Neste trabalho, a forma externa é a característica mais visível da obra arquitetônica e corresponde ao contorno externo da edificação. De um modo geral, essa forma é composta por superfícies e volumes de diferentes tamanhos e formatos. Para que se possa representar graficamente uma forma curvilínea, foco específico deste trabalho, é necessário estudar as definições e características desses elementos compositivos sob uma visão geométrica.

Na Geometria, uma forma pode ser construída por sólidos ou superfícies geométricas. A superfície é um conjunto de pontos no espaço que criam uma forma bidimensional, podendo ser plana, não plana e aberta ou fechada. Por exemplo, um quadrado é uma porção de uma superfície plana fechada que forma um polígono[80] de quatro lados iguais com ângulos retos entre eles (TANTON, 2005, p. 474). Quando uma superfície fechada circunscreve determinada porção limitada do espaço geométrico, cria um sólido. Em outras palavras, a

[80] Polígono é uma forma plana limitada por segmentos de reta chamados lados, que se encontram em pontos chamados vértices.

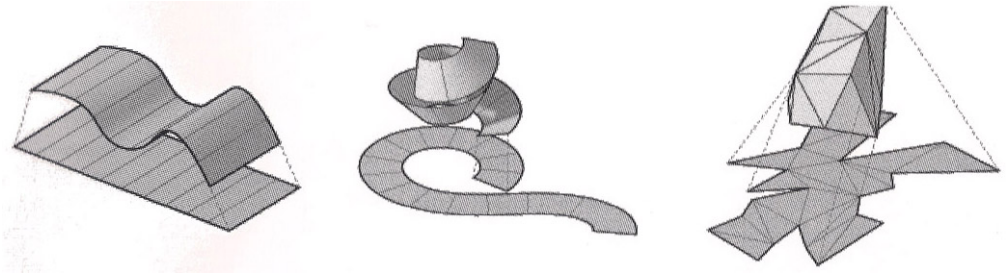
superfície pode ser vista como a “pele” do sólido geométrico, sendo esse último composto tanto pela superfície externa quanto pelo espaço interno que ela delimita. Uma vez que a superfície possui essa característica envoltória, decidiu-se por usar esse termo ao invés do sólido, principalmente, por se assemelhar com a visão de limite externo de uma obra arquitetônica.

De um modo geral, as superfícies geométricas são criadas a partir do movimento de uma linha no espaço, ou seja, a definição de uma área que contem as sucessivas posições de uma linha ao se deslocar contínua e ordenadamente por uma lei de geração. Comumente, a linha pode ser uma reta, uma curva ou uma poligonal e descreve um movimento de translação ou revolução em torno de um eixo. Na translação, a linha que se desloca é chamada de geratriz e a linha de apoio que delimita o caminho que geratriz percorre é a diretriz (RABELLO, 2011, p. 14).

As superfícies podem ser especificadas e classificada de várias maneiras. Mas, segundo Rodrigues (1969, p. 267) e Cardoso (2005, p. 45), a classificação das superfícies se faz, principalmente, quanto à natureza de sua geratriz. Se ela for reta será chamada de retilínea ou regrada (A). Por outro lado, se ela for curva será chamada de superfície propriamente curva (B). O primeiro caso pode ser divido em dois grupos: desenvolvíveis[81] (1a) e reversas (2a). Do mesmo modo, o segundo caso foi dividido em dois grupos: Circulares em geral (1b) e Quádricas em geral (2b).

Em maiores detalhes, as superfícies regradas podem ser desenvolvíveis (1a), ou seja, planificáveis (Figura 42), quando quaisquer duas de suas geratrizes forem coplanares. Alguns exemplos dessas superfícies são as superfícies cônicas em geral, as superfícies cilíndricas em geral e as superfícies de aresta de reversão (helicóide desenvolvível);

Figura 42 – Superfícies e suas planificações



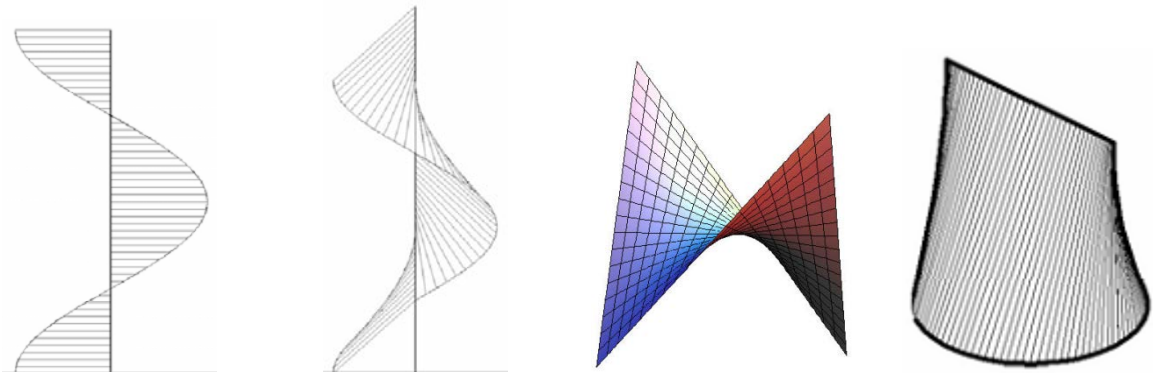
Fonte: BURRY; BURRY, 2010, p. 255

[81] Superfícies desenvolvíveis ou planificáveis são aquelas que podem ser planificadas sem que haja rupturas ou dobras ao longo de toda sua extensão (RABELLO, 2011, p. 21) ou podem ser desenroladas numa superfície plana sem cortes ou enrugamentos. Podem ser identificadas por possuírem curvatura Gaussiana igual a zero (k = 0) (SAXENA; SAHAY, 2005, p. 181).

Outro grupo que as superfícies podem pertencer é o das Reversas (2a), que receberam esse nome devido às retas utilizadas na sua construção serem reversas[82], o que acarreta a impossibilidade de planificação. Para ilustrá-las, têm-se os hiperbolóides escalenos de uma folha, o parabolóide escaleno de uma folha, o parabolóide hiperbólico, o cilindróide, o conóide e os helicóides axiais de plano e de cone diretor.

Figura 43 – Helicóide axial de plano diretor (a) e cone diretor (b); (c) parabolóide hiperbólico; (d) conóide

(a) (b) (c) (d)

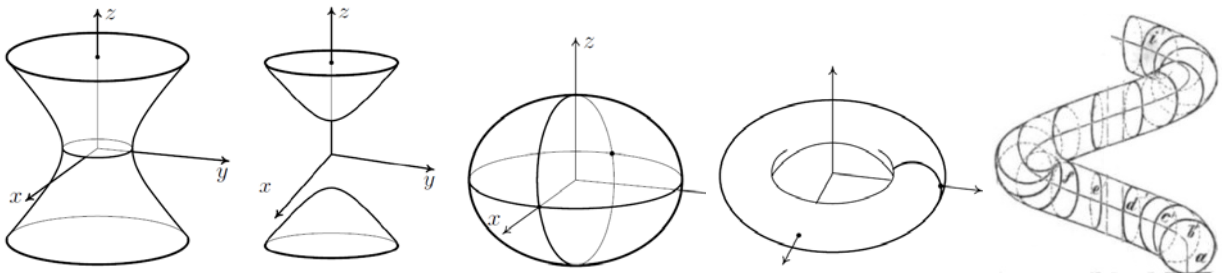


Fonte: SAXENA; SAHAY, 2005, p. 185.

Por um lado, a classe das superfícies propriamente curvas possui o grupo das circulares em geral (1b), que é subdividido no subgrupo das circulares de revolução, onde estão o cone de revolução, o cilindro de revolução, a esfera, o elipsóide de revolução, o parabolóide de revolução e o hiperbolóide de revolução de uma e duas folhas; e o sub-grupo das circulares de circunvolução onde se encontram o toro circular e a serpentina; Ambos subgrupos são construídos pela lei de geração chamada revolução, na qual a geratriz é rotacionada em torno de uma reta fixa (o eixo), mantendo constante a distância de cada ponto da geratriz ao eixo, assim descrevendo uma circunferência.

Figura 44 – hiperbolóide de revolução de uma (a) e duas folhas (b); (c) elipsóide; (d) toro circular; (e) sepertina

(a) (b) (c) (d) (e)



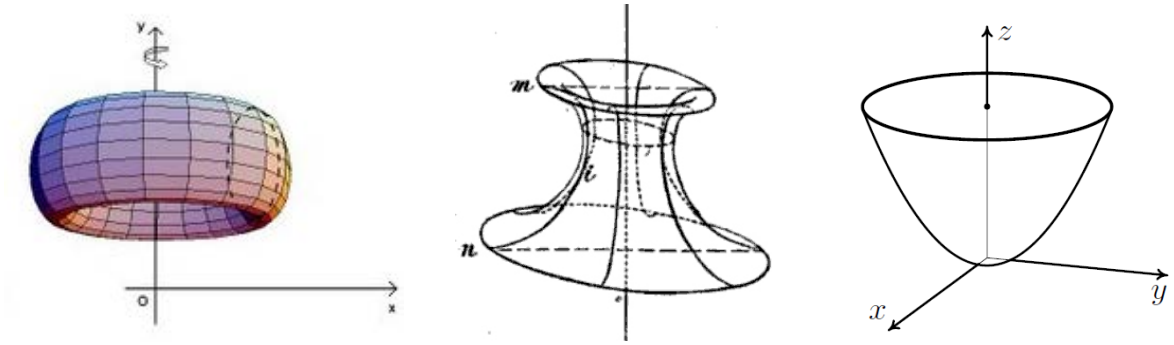
Fonte: AARTS, 2008, p. 315-316.

[82] Reta reversa é aquela cujos pontos não pertencem a um mesmo plano ou não são coplanares (RABELLO, 2011, p. 8).

Por outro lado, o grupo das quádricas em geral (2b), divide-se também em dois subgrupos: o das superfícies de primeira espécie, com o cone de 2ª ordem, o cilindro de 2ª ordem, o parabolóide elíptico, o elipsóide escaleno e hiperbolóide escaleno de uma e duas folhas; e o subgrupo de 2ª espécie, onde são encontrados o toro elíptico, hiperbólico e parabólico.

Figura 45 – (a) toro elíptico; (b) toro hiperbólico; (c) parabolóide elíptico

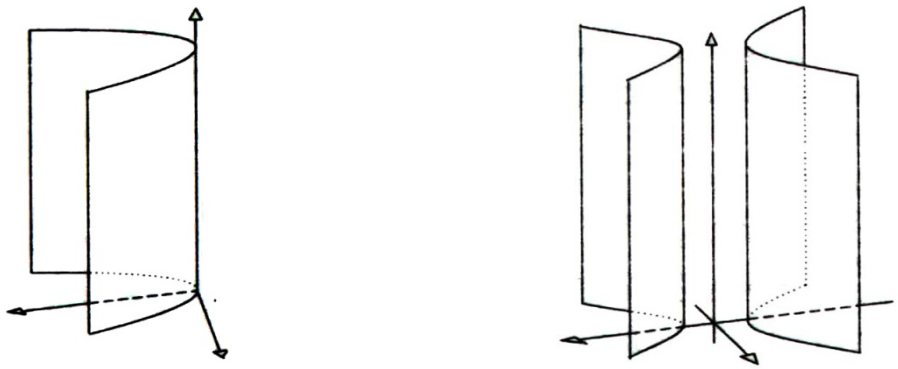
(a) (b) (c)



Fonte: AARTS, 2008, p. 330.

Figura 46 – Cilindros de 2ª ordem: (a) cilindro parabólico; (b) cilindro hiperbólico

(a) (b)



Fonte: AARTS, 2008, p. 330.

3.2 Linhas e Superfícies Curvas na Modelagem Geométrica

Ao longo do tempo, a Geometria sofreu várias mudanças em seu conteúdo teórico e prático. Da sua origem como uma ferramenta para descrever e medir formas, a Geometria como a ciência do espaço, evoluiu em direção a uma teoria de conceitos e métodos por meio dos quais é possível construir e estudar modelos idealizados de objetos do universo físico (CHIARELLA, 2004, p. 135). Exatamente, esse conhecimento é usado para representar as formas dos objetos por meio de descrições matemáticas. Essa representação é analítica e abstrata em comparação a modelos físicos como maquetes (MORTENSON, 1997, p. 2), porém é adequada a ser codificada em uma dada linguagem de programação e, consequentemente, trabalhada em ambiente computacional.

Isso é uma das razões que possibilitou o surgimento da Modelagem Geométrica e demonstra o quão fundamental é a sua dependência em relação aos conhecimentos da Geometria. Essa ligação pode ser percebida no conteúdo exposto no item 3.1. No qual, à medida que novos avanços no campo da Matemática foram descobertos, como a Geometria não-Euclidiana e Geometria Diferencial, novos conhecimentos sobre manipulação de formas foram criados. Essas inovações possibilitaram novos cálculos de superfícies complexas, especialmente as curvas, que ao serem codificados dentro de computadores através dos programas de modelagem geométrica possibilitaram novas técnicas de modelagem (FLORIO, 2008, p. 188).

Tais técnicas serão apresentadas, a seguir, em dois grupos: métodos de definições de superfícies e de transformações de superfícies. No primeiro, será apresentado como os programas de modelagem geométrica geram e definem as superfícies curvilíneas a partir de formulações matemáticas, mas sem se aprofundar em suas expressões, buscando focar em suas propriedades. No segundo, será mostrado como um usuário pode criar e manipular superfícies dentro do ambiente computacional por meio das propriedades das superfícies mostradas no item anterior.

Ressalta-se que, como o trabalho em questão busca uma aplicação no campo da Arquitetura, assim os conceitos matemáticos envolvidos em ambos os grupos, serão explicitados da maneira menos analítica possível e mais focados nas propriedades advindas do tipo de equação usada.

3.2.1 Métodos matemáticos de definições de superfícies

Atualmente, no campo da Modelagem Geométrica, muitas definições e representações de superfícies curvas são baseadas no conteúdo da Geometria Diferencial, devido aos recursos e as características discutidas no item 3.1. Nessa disciplina a superfície é definida como o lugar geométrico da trajetória de uma curva no espaço. Essa curva é o elemento básico de construção da superfície, pois suas propriedades matemáticas podem ser aplicadas de modo análogo na superfície. Por isso, neste item será primeiramente apresentada a definição de curva para depois fazer sua generalização para as superfícies.

3.2.1.1 Definição de Curvas

Existem dois conceitos de curva comumente utilizados. O primeiro caso define a curva como um conjunto infinito de pontos no espaço formando uma linha, enquanto o segundo como a

trajetória descrita pelo movimento contínuo de um ponto no espaço. Apesar dessa dualidade, a Matemática trabalha com ambas as definições, pois podem ser representadas analiticamente, usando-as para situações nas quais são mais apropriadas.

Na modelagem geométrica, os dois modos mais utilizados para criar a representação analítica desses conceitos são a interpolação (*curve fitting*) e a aproximação (*curve fairing*), sendo ambos baseados em métodos numéricos de análises (ver item 3.1.2). Esses métodos precisam de algumas informações *a priori*, que nesse caso seriam pontos especificados pelo usuário (mais a frente, serão chamados de pontos de controle). A interpolação (Figura 47a) traça uma curva que obrigatoriamente passa sobre os pontos dados e na aproximação (Figura 47b) a curva deve passar razoavelmente perto, ou seja, se aproximar dos pontos (MORTENSON, 1997, p. 12).

Figura 47 – (a) Interpolação; (b) aproximação

Fonte: própria autora

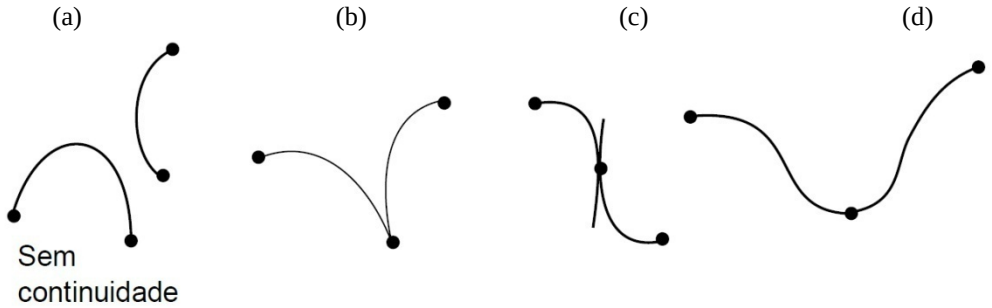
Pode parecer que a maneira mais fácil de controlar uma curva seja especificar um conjunto de pontos para ela interpolar. Na prática, contudo, a interpolação muitas vezes tem propriedades de curvatura instável, pois não oferecem controle do que acontece entre os pontos. Na aproximação, os pontos influenciam a forma da curva que captura a “forma” da distribuição dos pontos, mas não a especificam exatamente. Apesar de abandonar a capacidade de especificar diretamente o caminho na qual a curva passará, se ganha um comportamento mais estável da curva (FISHER; LOWTHER; SHENE, 2004).

Apesar da forma analítica de descrição das curvas possuir vantagens como ser precisa, compacta, não requer área de armazenamento e facilitar o cálculo de novos pontos (AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 76), também possui limitações. Uma delas é que algumas curvas não podem ser facilmente descritas por expressões analíticas em toda sua extensão, assim deve-se construí-la pela composição de segmentos de curvas, ou seja, uma curva composta (*piecewise*). Essa composição deve única e aparentar ser contínua, não tornando evidentes suas divisões. Para tanto, se deve estudar como esses segmentos individuais se conectam de modo a assegurar a continuidade entre eles. As equações que regem essa união são chamadas restrições de continuidade (*continuity constraints*) e são tipicamente escolhidas

para conferir uma determinada ordem de suavidade (*smooth*) para as curvas (BARSKY; DEROSE,1984, p. 1).

Existem dois tipos de continuidades nas curvas: a geométrica e a paramétrica. Como seus nomes sugerem, a continuidade geométrica requer que a geometria seja contínua, enquanto continuidade paramétrica exige que a parametrização[83] subjacente da curva também seja contínua. A escolha de qual deve ser utilizada será dependente da aplicação, para programas CAD se usa a geométrica (FOLEY et al., 1990, p. 516), na qual o presente trabalho focou-se. Comumente, são aplicadas três níveis de continuidade geométrica 0, 1 e 2. Para representar esses níveis usa-se a notação G^n, na qual a letra G maiúscula faz alusão ao tipo de continuidade e o número *n* sobrescrito, o nível. De acordo com Mortenson (1997, p. 77-80), a forma mais simples de continuidade G^0 assegura que as curvas se encontrem e por isso é chamada de Continuidade de ponto. O nível seguinte de continuidade G^1 assegura que as curvas tenham tangentes comuns e por isso é chamada de Continuidade de tangente. A continuidade G^2 implica que as duas curvas devem ter curvatura contínua ou Continuidade de curvatura. Resumidamente, todos esses níveis podem ser vistos na Figura 48.

Figura 48 – (a) Sem continuidade; (b) G^0; (c) G^1; (d) G^2



Fonte: AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 90.

Para a descrição analítica de curvas que possuam as características a cima são usadas equações paramétricas ou não paramétricas, sendo essa última dividida em duas classes: explícitas ou implícitas.

3.2.1.1.1 Formas Não-paramétricas

Nas representações não paramétricas a posição em *y* é dada como uma função de *x*, e vice-versa. A forma explícita é dada pela expressão $y = f(x)$, na qual dado um valor de *y* se obtém

[83] Continuidade paramétrica é um conceito aplicado às curvas paramétricas e descrevem a suavidade do valor do parâmetro com sua distância ao longo da curva. Ver parametrização de curvas no item 3.1 e equações paramétricas no item 3.2.1.1.2.

somente um valor para *x*. Enquanto a implícita é dada pela expressão $f(x, y) = 0$, na qual cada valor de *y* pode gerar mais de um valor para *x*.

As formas não paramétricas de descrição da curva somente podem ser utilizadas quando essa a função da curva é conhecida. Em aplicações práticas, onde são necessárias curvas complexas (tais como a forma de um automóvel ou de uma torradeira), a função é normalmente desconhecida, razão pela qual uma abordagem diferente é necessária (SALOMON, 2006, p. 11). Além disso, as formas não paramétricas possuem propriedades extrínsecas, portanto, a escolha do sistema de coordenadas afeta a facilidade de modelar as curvas e de calcular as suas propriedades (MORTENSON, 1997, p. 22).

Por outro lado, essas duas equações permitem a determinação rápida de se um ponto está sobre a curva ou em que lado da curva o ponto está (FOLEY et al., 1990, p. 478). Apesar de suas limitações, as equações implícitas provaram ser útil, geralmente como um complemento para um esquema híbrido de modelagem, complementando as equações paramétricas (MORTENSON, 1997, p. 22) e para a geração de superfícies implícitas que atendem a um tipo específico de modelagem que será discutida no item 3.2.2.2 sobre Métodos de Transformação de Superfícies.

3.2.1.1.2 Formas Paramétricas

A representação paramétrica, como o nome sugere, usa equações paramétricas para descrever uma curva. Essas equações em vez de definir uma relação direta entre as variáveis *x* e *y*, define ambas em relação a uma terceira variável chamada parâmetro. Em maiores detalhes, elas são um conjunto de equações coordenadas que expressam um conjunto de quantidades como funções de um número de variáveis independentes (parâmetro). Comumente, o parâmetro (com notação *t*) é interpretado como tempo, apoiando-se no conceito dinâmico de curva, e por isso informa a posição do ponto que se desloca no espaço em um determinado instante. Assim como é possível fazer um percurso de várias maneiras (mais rápida ou mais devagar, num sentido ou no outro, etc.) uma dada curva pode ter várias equações paramétricas. Pode-se ver um exemplo, para as equações paramétricas:

$$x = t^2 + t$$

$$y = 2t - 1$$

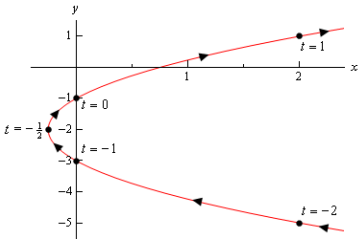
Tem-se o resultado na Figura 49:

Figura 49 – (a) Valores das variáveis; (b) gráfico resultante com movimento do ponto

(a)

t	x	y
-2	2	-5
-1	0	-3
$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{4}$	-2
0	0	-1
1	2	1

(b)



Fonte: DAWKINS, 2012.

Equações paramétricas têm muitas vantagens sobre outras formas de representação, que segundo Mortenson (1997, p. 31) e Azevedo e Conci (2003, p. 80) são a representação de curvas fechadas e com valores múltiplos. Além disso, por serem funções em relação ao parâmetro independente, elas possuem propriedades intrínsecas[84], ou seja, são independentes do sistema de coordenadas. Por sua vez, essa propriedade facilita a aplicação de transformações geométricas, de especial valor para o uso em ferramentas CAD. Por fim, para a forma paramétrica não há aumento de dificuldade entre a representação de curvas planas e espaciais.

Por isso tudo que a forma paramétrica é a mais usada para a descrição de objetos na modelagem geométrica (BARSKY, DEROSE; 1984, p. 2; MARSH, 2005, p. 98), principalmente usando o formato polinomial cúbico. Isso porque, os polinômios[85] facilitam a aplicação de métodos de analises, à exemplo da derivada e integral, pois é a função de menor grau[86] que possibilita a criação de curvas espaciais (FOLEY et al., 1990, p.479). As curvas paramétricas cúbicas são conhecidas pela maioria dos usuários da computação gráfica, a saber, Hermite, Bézier, Splines, B-spline e NURBS, que serão apresentadas a baixo.

3.2.1.1.2.1 Hermite

Segundo Farin, Hoschek e Kim, (2002), essa é uma curva paramétrica, criada graças ao estudo do uso de polinômios cúbicos para ajuste de curvas pelo matemático francês Charles Hermite (1822-1901). Essa interpolação polinomial do Hermite foi usada, mais tarde em

[84] Uma propriedade intrínseca é aquela que depende apenas do valor em questão, e não a sua relação com um sistema de coordenadas ou outro quadro externo de referência. O fato de que um retângulo tem quatro ângulos iguais é intrínseco ao retângulo, mas o fato de que um retângulo especial possui dois lados verticais é extrínseco, porque um quadro externo de referência é necessário para determinar qual a direção é vertical (MORTENSON, 1997, p. 19).

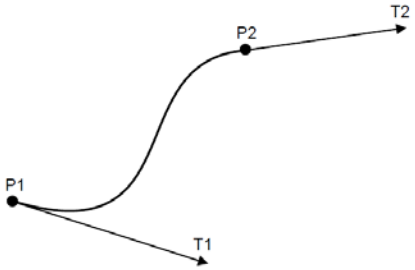
[85] Polinômio é um tipo de expressão algébrica que somente usa entre suas variáveis as operações aritméticas, que são: adição, subtração, divisão, multiplicação, potenciação e radiciação.

[86] O grau de um polinômio é o valor do maior expoente de uma variável da sua equação.

1964, por James Ferguson para descrever curvas para os primeiros programas de modelagem da Boeing. O trabalho de Ferguson criou a curva Hermite ou Ferguson, sendo o primeiro nome mais usado.

A construção de um segmento dessa curva se dá pela interpolação dos pontos iniciais (P_1) e finais (P_2). Nesses pontos existem dois vetores T_1 e T_2, que contêm a informação da direção e do comprimento (*magnitude*) das suas tangentes. Esses quatro fatores de controle influenciam a composição geométrica da curva resultante, conforme mostrado na Figura 50.

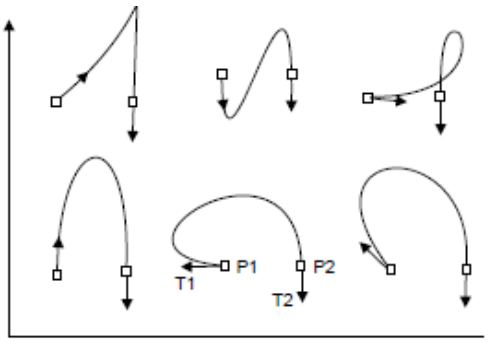
Figura 50 – Elementos da curva de Hermite



Fonte: AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 81.

Resumidamente, existem duas maneiras de manipular a curva Hermite, alterando a direção (Figura 51) ou o peso (Figura 52) dos vetores tangentes. À medida que se altera um desses fatores, se obtém uma curva diferente, apesar de manter os pontos de controle fixos.

Figura 51 – Diferentes resultados obtidos pela alteração na direção da tangente inicial (T1) da curva de Hermite



Fonte: AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 86.

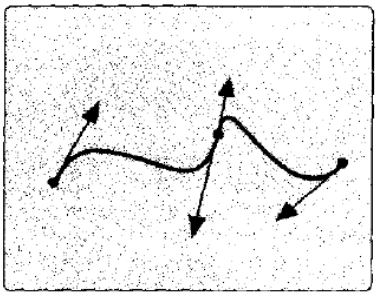
Figura 52 – Efeito da variação do comprimento do vetor da curva Hermite

Fonte: SALOMON, 2006, p. 113.

Essa situação confere à curva uma grande versatilidade de modelagem, que permite, em um dado momento, uma forma suave e homogênea, e em outro, curvas mais bruscas, podendo apresentar "*loops*" (AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 82).

No caso de uma curva Hermite composta (*piecewise*), sua construção se dá com uma continuidade G^1, que pode ser alcançada com uma linha tangente comum no ponto de junção dos segmentos, ou seja, sua condição de restrição é a colinearidade[87] das tangentes na junção (FOLEY et al., 1990, p. 487).

Figura 53 – Exemplo de uma Hermite composta (*piecewise*)



Fonte: FOLEY et al., 1990, p. 487.

Infelizmente, essa curva composta tem suas limitações. Primeiro, elas possuem controle global e por isso ao se alterar pontos de controle, também se modifica a forma geral da curva composta. Depois, para o usuário não é tão intuitivo trabalhar com as variações criadas pelos vetores, o que cria preferência pelos pontos de controle. Por fim, essa curva só é invariante sob transformações isométricas, especificamente rotação e translação, assim somente permitindo o uso dessas operações de transformação e limitando sua capacidade de modelagem (SAXENA; SAHAY, 2005, p. 110).

Apesar disso, as curvas Hermite possuem sua relevância, pois contribuíram para um controle mais interativo e versátil da modelagem das curvas. Elas foram o começo dos estudos de curvas na modelagem geométrica e, ao serem tomadas como curva elementar, possibilitaram a construção das outras curvas paramétricas (MORTENSON, 1997, p. 33), que serão apresentadas a seguir.

3.2.1.1.2.2 Bézier

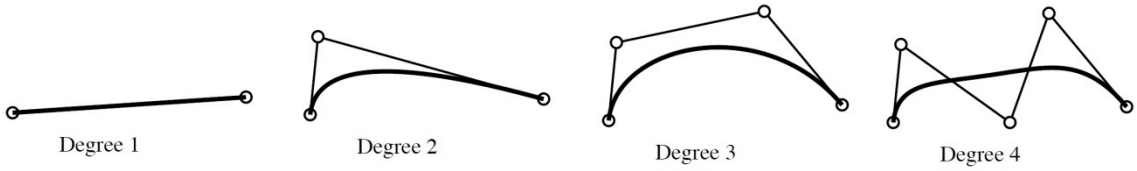
Conforme Saxena e Sahay (2005), essa é uma curva paramétrica, baseada no estudo do uso de polinômios para ajuste de curvas por meio da teoria da aproximação feita pelo matemático russo Sergei Natanovich Bernstein (1880-1968). Essa aproximação polinomial de Bernstein

[87] Diz-se dos pontos que estão sobre a mesma reta.

foi usada independentemente, na década de 60, por tanto Pierre Etienne Bézier na Renault, quanto por Paul de Faget de Casteljau na Citroën, para descrever curvas para os primeiros programas de modelagem geométrica para automóveis. Como o primeiro publicou seus trabalhos anteriormente ao segundo, em 1971, a curva ficou conhecida como curva de Bézier.

A construção de um segmento dessa curva é similar a curva de Hermite, porém a curva Bézier não possui vetores tangentes, somente pontos de controle. Além disso, a curva de Bézier pode ser construída com diferentes números de pontos de controle e não somente dois como a curva Hermite. Em maiores detalhes, o número de pontos de controle dessa curva é definido pelo grau do polinômio de Bernstein usada nela. Essa quantidade é sempre um número maior do que o grau do polinômio, isto é, uma curva de grau n terá $n + 1$ pontos de controle. Assim, a curva de Bézier (Figura 54) pode ser gerada por 3, 4, até $n + 1$ pontos de controle (AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 87). Deve-se destacar que independentemente do grau da curva, o primeiro e o último pontos de controle serão sempre interpolados, enquanto os pontos intermediários serão aproximados. Essa propriedade se torna importante em questões de modelagem, pois possibilita ao usuário a determinar o começo e o fim da curva.

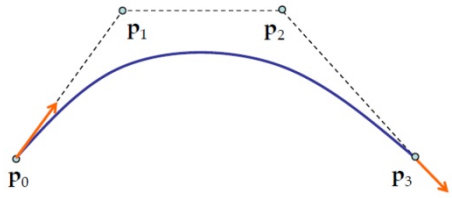
Figura 54 – Curvas Bézier de diferentes graus (*degree*)



Fonte: SEDERBERG, 2011, p. 19.

Geralmente, em computação gráfica se utiliza a curva de Bézier em sua forma cúbica (Figura 55). Essa curva faz a interpolação dos pontos iniciais (P_0) e finais (P_3), ao mesmo tempo em que faz a aproximação dos outros dois pontos (P_1 e P_2). Neste caso, esses pontos intermediários são uma especificação indireta da tangente, ou seja, as tangentes à curva em P_0 e P_3 têm a direção dos segmentos de reta P_0P_1 e P_2P_3, respectivamente (MORTENSON, 1997, p. 33).

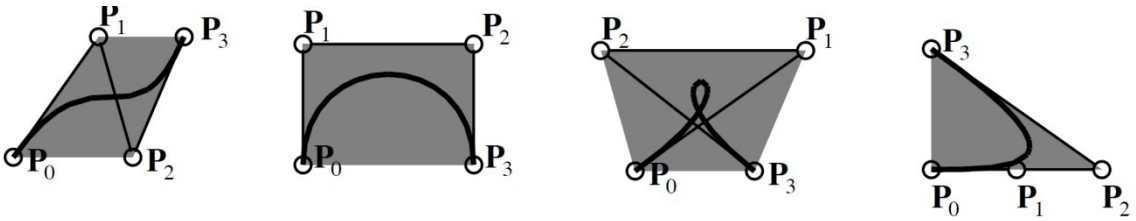
Figura 55 – Curva Bézier cúbica



Fonte: SEDERBERG, 2011, p. 18.

Esses segmentos de reta ao serem unidos, criam uma figura chamada de fecho convexo (*convex hull*), da qual a curva sempre estará interna a ela (Figura 56). Em outras palavras, a curva Bézier possui a propriedade de se manter dentro da região delimitada pelo polígono que tem como vértices os seus pontos de controle. Esse polígono formado pelos pontos de controle desempenha duas funções. Primeiro, estabelece a forma inicial da curva e, em seguida, fornece uma estrutura para alterar a curva. Em ambas as funções, o polígono ajuda a que o usuário antecipe tanto a forma da curva como também os resultados das alterações na sua forma de maneira previsível (MORTENSON, 1997).

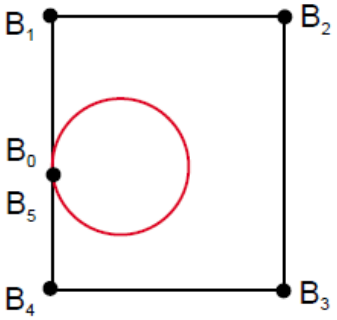
Figura 56 – Simulação do fecho convexo em curvas Bézier



Fonte: SEDERBERG, 2011, p. 24.

Outra propriedade da curva Bézier é a possibilidade de criar curvas fechadas, o que acontece quando o primeiro e o último ponto de controle coincidem (Figura 57).

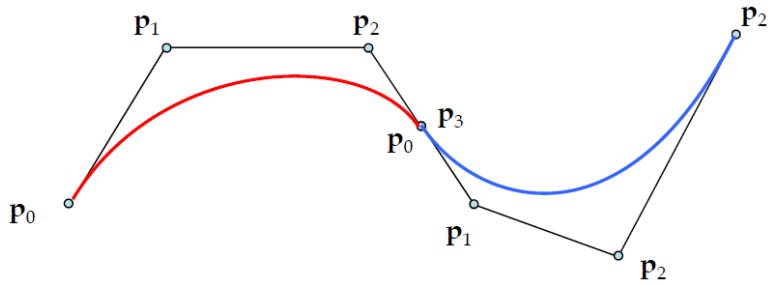
Figura 57 – Curva Bézier fechada



Fonte: AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 88.

Apesar dessas propriedades das curvas Bézier, elas não são adequadas para grandes conjuntos de pontos de controle uma vez que levaria a polinômios de grau elevado, que, consequentemente, causaria aumento no custo de processamento computacional e instabilidade no comportamento da curva. Uma alternativa simples, quando forem necessários muitos pontos de controle, é a conexão de vários segmentos de curvas de graus menores, que comumente é usada a sua forma cúbica. No caso de uma curva Bézier composta (*piecewise*), sua construção se dá com uma continuidade G^1, assim como na curva Hermite. Uma vez que na curva Bézier são conhecidas as tangentes dos pontos finais, como descrito anteriormente, essa condição é alcançada facilmente (AZEVEDO; CONCI, 2003).

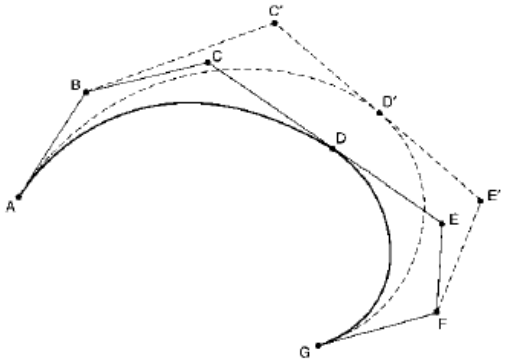
Figura 58 – Curva Bézier composta (*piecewise*)



Fonte: SEDERBERG, 2011, p. 32.

Essa continuidade gera custo para a modificação da forma da curva Bézier composta. Nesse caso o controle é global, ou seja, a mudança de posição de qualquer ponto de controle produz mudança de forma ao longo da curva. Esse tipo de controle pode ser uma característica negativa para um usuário que deseja fazer ajustes finos na forma final do modelo. Mais especificamente, na curva Bézier, o usuário é obrigado a mudar dois pontos de controle na vizinhança do ponto de junção ao longo de uma linha reta para manter a continuidade G^1 (SAXENA; SAHAY, 2005, p. 10). Na Figura 59, pode-se visualizar esse tipo de alteração que produziu o movimento do ponto C para C' e o do mesmo modo para os pontos D e E.

Figura 59 – Simulação de uma curva Bézier composta sendo alterada



Fonte: MORTENSON, 1997, p. 107.

Dessa situação é possível inferir que o usuário não pode mover qualquer ponto de controle arbitrariamente e, ao mesmo tempo, manter a continuidade. Isso cria uma limitação na interação da modelagem da curva Bézier, que não é completamente intuitiva, uma vez que existem pontos de controles que não são livres, mas possuem as restrições (*constraints*) citadas à cima.

Mediante os fatos citados à cima, percebe-se que a curva Bézier, assim como a curva Hermite, possui um processo de modelagem interativo, que em seu caso é dado pela realocação de pontos de controle que guiam a forma da curva. Apesar de não ser totalmente intuitiva para o usuário, sua curva de aprendizagem é curta e demanda um menor conhecimento matemático

do que a curva Hermite. Isso porque, a curva Bézier, por não usar o conceito de vetor, mas apenas pontos, é mais facilmente entendida pelos usuários em geral (AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 87). A curva Bézier ganha vantagem sobre a Hermite por ser invariante sob transformações Afim, assim possibilitando maior número de transformações geométricas e consequentemente maior capacidade de modelagem. Por fim, as curvas Bézier foram utilizadas por alguns anos na modelagem de objetos para indústrias automobilística e naval, mas atualmente são mais aplicadas em programas gráficos vetoriais como Corel Draw e o Adobe Illustrator.

3.2.1.1.2.3 Spline

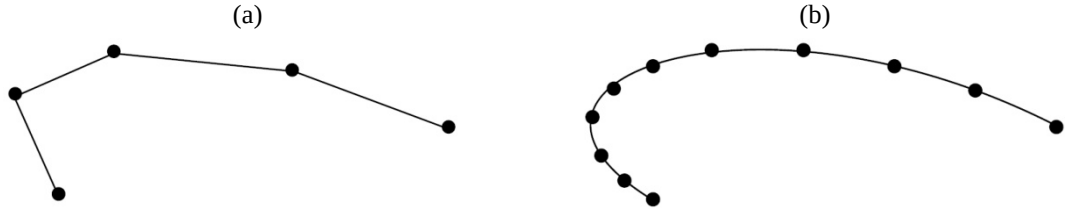
Spline possui uma longa história em computação gráfica e antes disso em desenho técnico. Esse nome faz alusão ao termo da língua inglesa utilizado para denominar um instrumento de desenho que criava as curvas de formas livres (*free-form*) usadas para definir as formas de barcos, carros e aviões. Tal ferramenta era uma longa e fina régua feita de metal ou madeira, que era guiada por meio de um conjunto de pesos chamados *ducks* (FAUX; PRATT, 1979, p. 14; AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 92; SAXENA; SAHAY, 2005, p. 10). Na modelagem geométrica, a *spline* é uma versão matemática análoga a essa régua, tanto que a *Spline* Cúbica Natural é a sua exata expressão matemática. Essa *spline* matemática foi introduzida por Schoenberg em 1967, quando o termo foi usado pela primeira vez em um periódico científico. Tal feito foi possível, ao se observar que para deflexões pequenas, a forma assumida pela *spline* física era uma curva composta (*piecewise*) por meio de um polinômio cúbico (BARTELS; BEATTY; BARSKY, 1987, p. vii). Por essa definição que alguns autores consideram como exemplos de *splines* as curvas compostas de Hermite ou de Bézier.

Mas, essa definição deixou passar uma característica importante da *spline* física, a curvatura contínua, ou seja, possuir continuidade geométrica G^2 (SAXENA; SAHAY, 2005, p. 130). Isso acontece visto que uma *spline* física resiste a se entortar (no sentido de inflexão brusca) devido às características do metal ou madeira com a qual era geralmente feita. Isso resulta em formas que são tanto esteticamente agradável, como fisicamente mais eficiente (FARIN; HOSCHEK; KIM, 2002, p. 7). Logo, a *spline* é mais suave (*smooth*) que as curvas de Hermite e de Bézier, o que exclui ambas dessa categoria.

Se baseando em Farin (2002), a definição mais completa de *spline* é uma aproximação suave (*smooth*) e polinomial de curvas compostas (*piecewise*) com continuidade geométrica G^2.

Essas *splines* podem ser classificadas como uniformes ou não uniformes. Tal classificação é baseada na regularidade do tamanho do intervalo criado pelas partes (cada segmento) da curva composta. A *spline* uniforme é formada de segmentos de mesmo comprimento e a não uniforme de segmentos de comprimento diferente (GOMES; VELHO, 1990, p. 133-34). Essa última é mais indicada para curva, pois possibilita um controle mais preciso de sua forma, especialmente nas partes de curvatura mais acentuada que necessitam de mais segmentos para serem descritas, ao contrário dos trechos de menor curvatura (ver Figura 60).

Figura 60 – (a) *Spline* uniforme; (b) *Spline* não uniforme



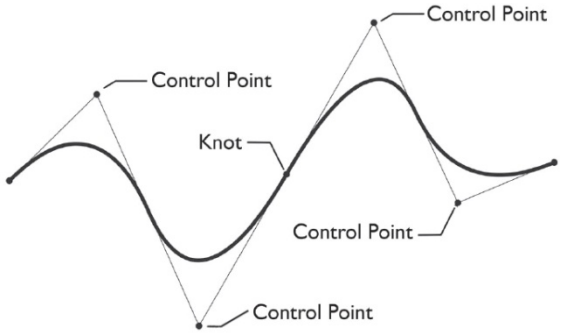
Fonte: AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 76.

Dentre essas várias categorias de *splines*, as mais usadas e conhecidas são a *B-spline* e a NURBS, por isso serão apresentadas em maiores detalhes a seguir.

3.2.1.1.2.4 B-spline

Segundo Farin, (2002, p. 119), a *B-spline* foi estudada no século XIX por um dos criadores da geometria não-euclidiana (Hiperbólica), Nikolai Lobachevski. Entretanto, como método para traçado de curvas na Computação Gráfica, de acordo com Salomon, (2006, p. 251), foi proposta em 1940, mas foi seriamente desenvolvida somente na década de 1970, por vários pesquisadores, principalmente por Gordon e Riesenfeld em 1974.

Figura 61 – Elementos da B-spline



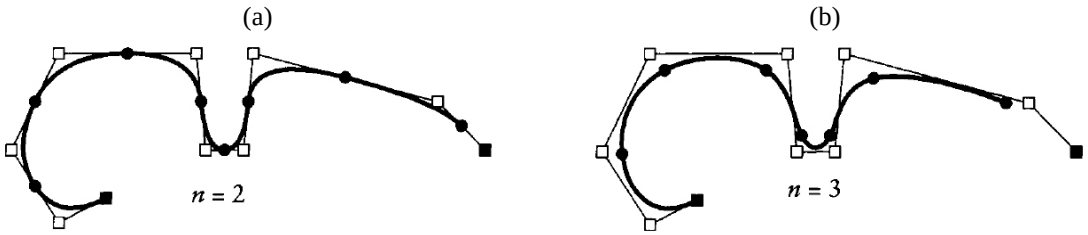
Fonte: CABRINHA, 2005, p. 159.

A *B-spline* é a abreviação de *Spline* Base (*Basis spline*). Recebeu esse nome pois é construída por aproximação por função base ou básica. Essa função é a versão *spline* do polinômio de

Bernstein usado na aproximação da curva Bézier, isto é, são análogas (SAXENA; SAHAY, 2005, p. 110). Isso se dá, pois, a *B-spline* é uma generalização da curva Bézier, ou seja, é composta de curvas Bézier, que funcionam como seus segmentos. Sendo que o ponto final de um segmento é o ponto inicial para segmento subseqüente e seu encontro é chamado de nó (*knot* – Figura 61) (ROGERS, 2001, p. 14).

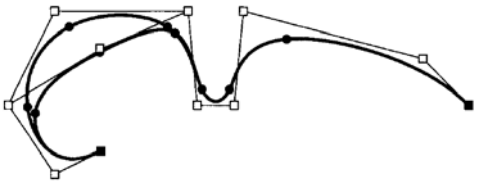
As *B-splines* preservam as propriedades de curvas Bézier, que compreende ser tanto interna ao fecho convexo dos pontos de controle e quanto invariantes sob transformações afins. Por outro lado, a curva *B-spline* supera as desvantagens principais da curva Bézier, que são (1) o grau da curva Bézier depende do número dos pontos de controle, (2) ela oferece apenas controle global, e (3) a Bézier alcança a continuidade G^1, mas é difícil de obter G^2 (SALOMON, 2006, p. 251). Assim, o grau da sua função de base é definido independentemente do número de pontos de controle (Figura 62), que possibilita a definição do número de pontos de controle pelo usuário, que pode inseri-los ou retirá-los. Além disso, a manipulação desses pontos possui o controle local[88] da forma (Figura 63) e, ao longo da curva, existe a continuidade G^2. Todas essas propriedades são possíveis graças ao uso da função base (MORTENSON, 1997, p. 33). Resumidamente, a curva *B-spline* possui três tipos de elementos de manipulação da sua forma: o conjunto de pontos de controle, o conjunto de nós e o grau de curva.

Figura 62 – (a) *spline* de grau 2; (b) *spline* de grau 3



Fonte: FARIN, 2002, p. 128.

Figura 63 – Controle local na *B-spline*



Fonte: FARIN, 2002, p. 130.

[88] O controle local acontece quando uma mudança na posição de qualquer ponto de controle não é propagada ao longo da curva, ou seja, globalmente. Assim, os pontos de controle influenciam apenas alguns dos segmentos de curva nas proximidades (MORTENSON, 1997, p. 33).

Conforme, Salomon, (2006, p. 251), existem vários tipos de *B-splines* e elas são classificadas por dois critérios: a uniformidade e a racionalidade[89]. No primeiro critério recebem o nome de uniforme (também chamada de periódica) as *B-splines* que possuem o intervalo entre os nós uniformemente espaçados. O caso contrário, de nós espaçados em intervalos irregulares, são chamadas de *B-spline* não uniforme. No segundo critério recebem o nome de racional as *B-splines* que são descritas como a razão de dois polinômios. O caso contrário, de serem descritas por um polinômio, são chamadas de *B-spline* não racional.

Para questões de modelagem de curvas é interessante que o critério de uniformidade não seja atendido, pois possibilita maior controle da forma, como discutido no item sobre *spline*. Do mesmo modo, ser racional é importante, pois proporciona a propriedade de serem invariantes a transformações de projeção às curvas (AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 99). Assim, é de especial interesse as curvas *B-spline* Racionais Não-Uniforme, mais conhecida pela sua abreviatura em inglês *NURBS* (*Non Uniform Rational Basis Spline*) e será discutida a seguir.

3.2.1.1.2.5 NURBS

Superfícies e curvas racionais são estudadas há um longo tempo na área de Geometria Algébrica, mas foram introduzidos na computação gráfica por Steve Coons em 1967, mas foi somente em 1987 que as *B-splines* racionais foram consolidadas por Les Piegl e Wayne Tiller no seu trabalho Curve and surface constructions using rational B-splines (ROGERS, 2001, p. 129). Após essa época, os *NURBS*, um caso especial de *B-spline* racional, se tornaram populares ferramentas e tão amplamente utilizados, a ponto de quase se tornarem um padrão para programas de modelagem geométrica na indústria.

As *NURBS* são generalizações das *B-Spline* não racionais (PIEGL, 1991, p. 56) e por isso preservam as propriedades dessas curvas, mas acrescentam outras. Primeiro, por serem generalizadas elas oferecem uma base matemática unificada, ou seja, uma única forma matemática de representar precisamente tanto as formas tradicionais, que eram aproximadas até então, como cônicas (Figura 64a) e superfícies quadráticas, quanto curvas e superfícies de formas livres, usada em fuselagem de carros, de navios e aviões (PIEGL, 1991, p. 57). Como resultado, um banco de dados unificado pode armazenar todas as informações gerando uma diminuição significativa do custo de processamento computacional (FOLEY et al., 1990, p. 514).

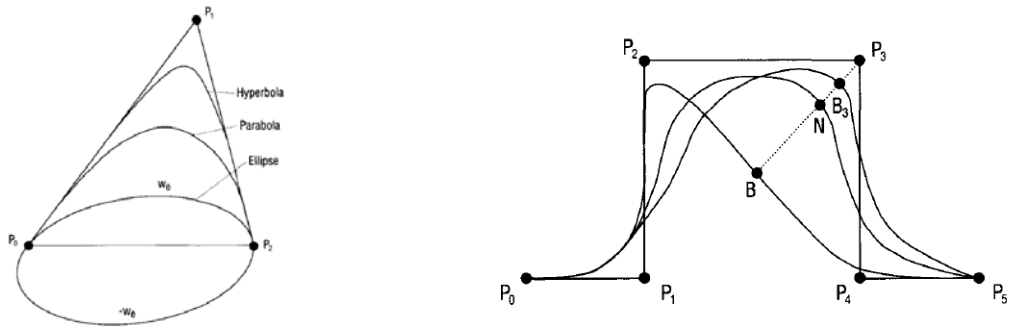
---

[89] Em Matemática é a propriedade de proceder de uma razão entre dois elementos, que poderia ser um número, uma variável ou uma função.

Além disso, na manipulação da sua forma, a *NURBS* acrescenta um elemento, além dos pontos de controle e nó da *B-spline*, o peso (*weight*). Esse elemento é um valor atribuído a cada ponto de controle que atua como uma espécie de força magnética que atrai ou repele uma determinada porção da curva em relação a esse ponto de controle. Mais especificamente, na Figura 64 (b), nota-se que as alterações no valor do peso irão mover um ponto da curva (B) ao longo de uma linha reta através do seu ponto de controle (P_3) correspondente (MORTENSON, 1997, p. 140).

Figura 64 – Variação de valores de peso: (a) criam as cônicas; (b) três valores diferentes

(a) (b)



Fonte: PIEGL, 1991, p. 60.

Além disso, na NURBS se pode definir qual nível de continuidade na junção dos nós. A vantagem dessa propriedade está na possibilidade de se interpolar um ponto escolhido pelo usuário, apesar dessa curva ser por aproximação, mas sem o efeito indesejável das *B-splines* uniformes onde os segmentos da curva de cada lado do ponto de controle que foi interpolado se tornem linhas retas (FOLEY et al., 1990, p. 495).

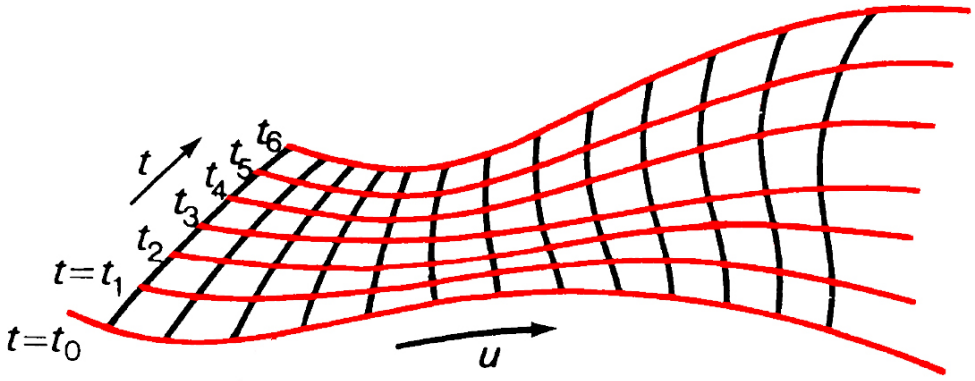
Por fim, como comentado no item sobre *B-spline*, a forma racional torna as NURBS invariantes sobre transformações de projeção, de modo que essas operações podem ser aplicadas diretamente sobre as curvas NURBS, mas especificamente seus pontos de controle, ao contrário das curvas não racionais que precisavam passar por processos intermediários de transformação, algo pouco eficiente (FOLEY et al., 1990, p. 504). Assim, NURBS podem se utilizar das características da geometria projetiva, como as projeções ortogonais e perspectivas, diretamente. Tal propriedade é de vital importância para as visualizações dos modelos pelo monitor de vídeo, que são projeções.

3.2.1.2 Definição de superfície

Existem vários conceitos de superfícies, a qual pode ser definida como a união das vizinhanças de um conjunto contínuo de pontos (MORTENSON, 1997, p. 143). Por outro

lado, uma superfície é o lugar geométrico de uma curva que se move através do espaço e, simultanemente, alterando a sua forma (FARIN, 2002, p. 251). Numa abordagem mais voltada para a aplicação na computação gráfica, a superfície é uma extensão da definição de curva, descrita no item 3.2.1.1, para dois parâmetros: *t* que informa a posição da curva que se desloca no espaço em um determinado instante e *u* que informa as novas posições dos pontos internos a curva em movimento, o que ocasiona a mudança de forma (FAUX; PRATT, 1979, p. 89).

Figura 65 – Superfície gerada pelo movimento da curva (em vermelho) no espaço a cada instante *t*, com alterações da posição dos seus pontos internos em "*u*"

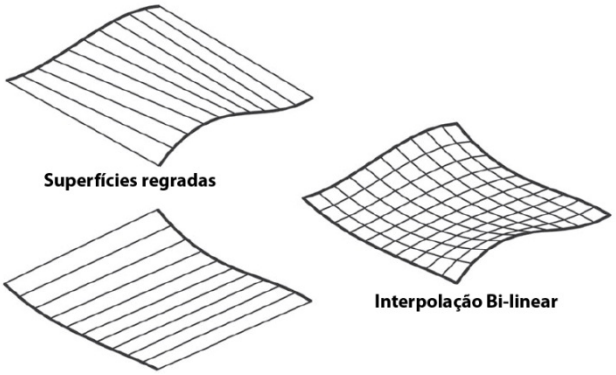


Fonte: FAUX; PRATT, 1979, p. 89.

Essa definição é descrita por equações bi-paramétricas, ou seja, possuem dois parâmetros, que foram padronizados em *u* e *v*, devido às coordenadas curvilíneas estudadas por Gauss (ver item 3.1.2). Assim, de um modo geral, as superfícies são descritas por uma rede ou trama de curvas, que podem ser qualquer uma das curvas descritas até agora (Hermite, Bézier e etc..). Entre essas curvas se formam uma superfície quadrangular que é chamada de retalho (*patch*) que é análogo a um segmento de uma curva *spline* (MORTENSON, 1997, p. 149).

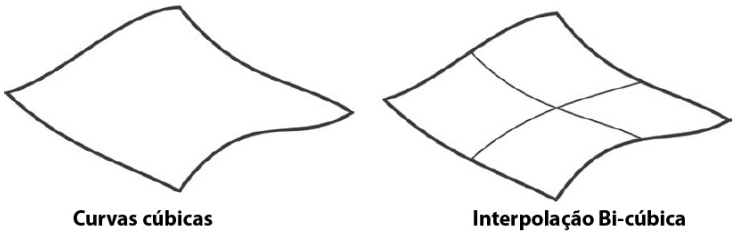
Nesse caso, a abordagem é chamada de *Tensor product patch* e abrange várias funções *blending*, as quais possuem a função de combinar as sucessivas posições da curva para criar a superfície (FAUX; PRATT, 1979, p. 200). Deve-se destacar duas: Interpolação Bi-linear (Figura 66) e Bi-cúbica (Figura 67), ambas funções trabalham de forma análogas as técnicas de ajustes usadas nas curvas. Na primeira são combinadas duas superfícies regradas, logo uma das curvas deve ser uma reta. Na segunda, são combinadas duas curvas paramétricas cúbicas (CABRINHA, 2005, p. 161). Dois exemplos bem conhecidos dessas técnicas são, para a Bi-linear tem-se o *Coons Patch* e para a bi-cúbica tem-se a superfície NURBS.

Figura 66 – Duas superfícies regradas combinadas por interpolação bi-linear



Fonte: CABRINHA, 2005, p. 160.

Figura 67 – Curvas paramétricas combinadas por interpolação bi-cúbica

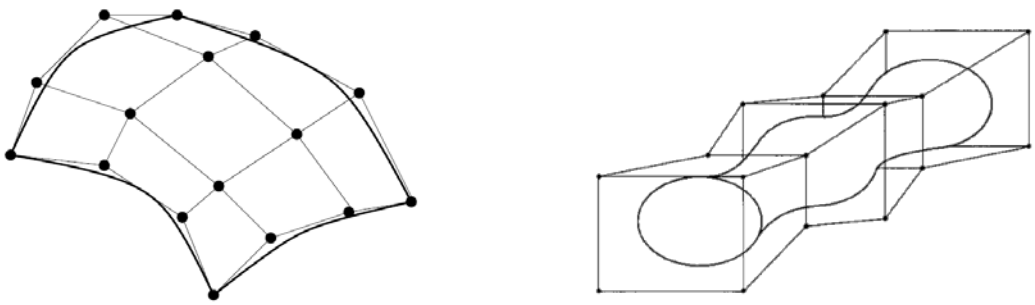


Fonte: CABRINHA, 2005, p. 160.

As superfícies que foram criadas com bases nas curvas paramétricas, podem ser consideradas como as suas generalizações e, desse modo, suas propriedades são análogas. Por isso não serão repetidamente descritas nesse momento, somente se destacará uma característica que se julgou importante de ser visualizada em sua versão para superfície: o *lattice* (Figura 68b). Essa propriedade é a rede de pontos de controle criada em volta da superfície com a qual o usuário pode modificar a sua forma da mesma maneira comparável ao fecho convexo nas curvas. O *lattice* também pode ser chamado de poliedro de controle (para superfícies fechadas) ou malha de controle.

Figura 68 – (a) Malha de controle em superfície Bézier; (b) poliedro de controle

(a) (b)



Fonte: (a) KLAWONN, 2008, p. 173; (b) MORTENSON, 1997, p. 234.

3.2.2 Métodos de modelagem para geração e transformação de superfícies

Atualmente, o usuário de programas de modelagem geométrica não se envolve com complexas expressões matemáticas para conseguir criar objetos em ambiente computacional. Ele faz uso de programas onde os objetos abstratos e funções do sistema matemático foram implementados como recursos de modelagem. Assim, elas permitem que o usuário crie objetos, mesmo intuitivamente, através de comandos do programa, que usam técnicas de modelagem para desenvolver, construir e manipular geometricamente a forma (CHIARELLA, 2004; WONG, 2010).

Essas técnicas de modelagem visam permitir a construção e a representação geométrica das superfícies e utilizam diversos tipos de superfícies mostradas anteriormente, criando novas superfícies usando transformações geométricas (GOMES; VELHO, 1990, p. 144). Cada uma dessas operações possui características que podem facilitar a construção e modificação de determinada geometria. Por isso, esse item foi dividido em duas partes: geração e transformação de superfícies. Na primeira serão apresentadas técnicas para criar superfícies utilizadas pelos usuários através de comandos em programas de modelagem geométrica. A segunda categoria mostrará técnicas para modificar a estrutura geométrica do objeto, também a partir da visão do usuário.

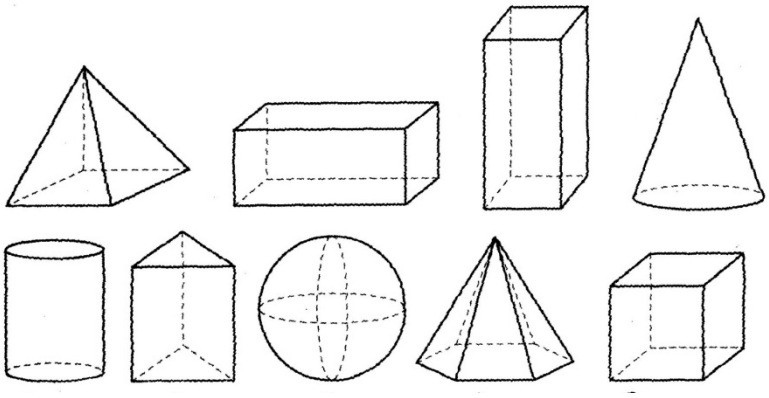
3.2.2.1 Métodos de criação de superfícies

Os tipos mais conhecidos são a modelagem por Primitivas Geométricas, Formas Livres (*free-form*), secções transversais (*loft*) e por varredura (*sweep*). Esse último pode ser divido em três grupos: extrusão, revolução e superfícies tubulares, que serão apresentados a seguir.

3.2.2.1.1 Primitivas Geométricas

Esta técnica de modelagem cria novos objetos através da justaposição de primitivas geométricas mediante transformações geométricas (apresentadas no item 3.2.2.2). As primitivas geométricas constituem uma coleção de formas pré-construídas (meta-modelo), que possuem poucos parâmetros de configuração formal, como altura, largura e comprimento. São formas padronizadas e de fácil definição matemática (AZEVEDO; CONCI, 2003) que são consideradas os blocos básicos da construção do objeto. Para os arquitetos essa técnica de modelagem trabalha do mesmo modo que na visão formal purista defendida por modernistas como a de Le Corbusier em seu livro Por uma Arquitetura.

Figura 69 – Formas primitivas

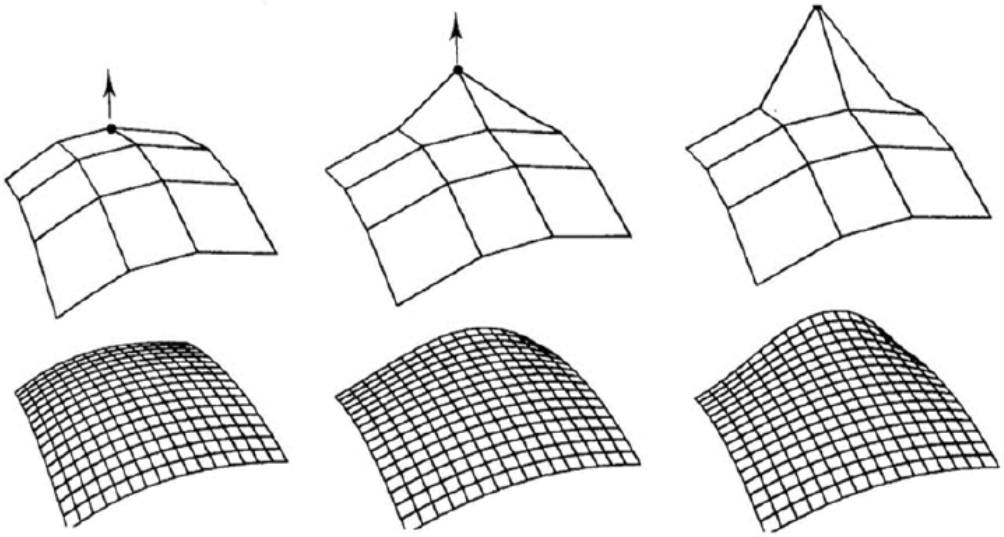


3.2.2.1.2 Formas livres (*Free-Form*)

Essa técnica se fundamenta na ideia básica dos retalhos (*patches*), discutida no item 3.2.1.2. Superfícies podem ser geradas pela combinação de pedaços criados por essas curvas (hermite, bézier, splines ou NURBS) como na confecção de uma “colcha de retalhos”. Essa forma é conhecida como geração de superfícies por formas livres (AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 106).

Nessa técnica, os pontos de controle que definem a superfície são obtidos a partir de uma configuração inicial aproximada, que gera uma malha. Assim a superfície é “esculpida” por meio da manipulação (Figura 70) dessa malha ao se mover esses pontos de controle ou conjunto deles, similar ao funcionamento do fecho convexo, que através de ajustes sucessivos se chega a forma desejada (GOMES; VELHO, 1990, p. 145).

Figura 70 – Manipulação de uma forma livre (*Free-form*)

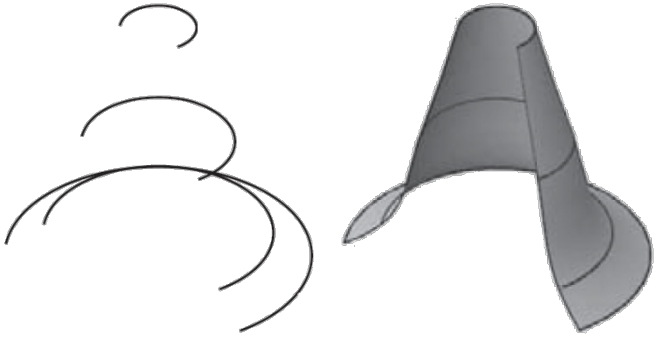


Fonte: GOMES; VELHO, 1990, p. 145.

3.2.2.1.3 Secções transversais

Essa técnica constrói a superfície interpolando suas seções transversais (Figura 71), ou seja, é a união de curvas ou linhas planas em série por uma superfície que as contém. É especialmente indicada quando as seções não são semelhantes, mas somente executada quando as curvas são de mesma natureza. Isto é, ou todas fechadas ou todas abertas. Sua aplicação é comum na construção de imagens médicas ou em modelos topográficos (GOMES; VELHO, 1990, p. 145). Seu nome em inglês, *loft*, veio da construção de navios, a qual se baseia em seções transversais.

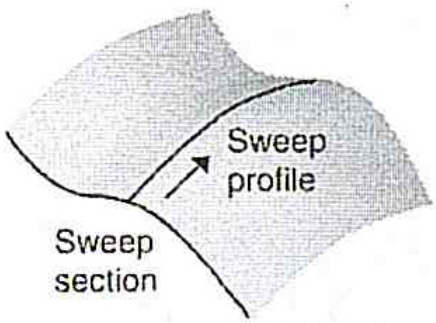
Figura 71 – Exemplo de produção de superfície curva por seção transversal



3.2.2.1.4 Varredura (*Sweep*)

Essa técnica é análoga a descrição de superfície discutida no item 3.1.7, onde é definida pelo movimento de uma linha no espaço. No presente caso, é o procedimento de gerar uma superfície através do movimento de uma curva ou forma plana ao longo de um caminho. Em maiores detalhes, a varredura cria objetos baseados na noção de que uma curva C1, quando deslocada no espaço ao longo de uma trajetória dada por outra curva C2, descreve uma superfície. Essa curva C1 recebe o nome de contorno (*profile*) ou geratriz e a C2 tem o nome de caminho (*path*) ou diretriz (AZEVEDO; CONCI, 2003).

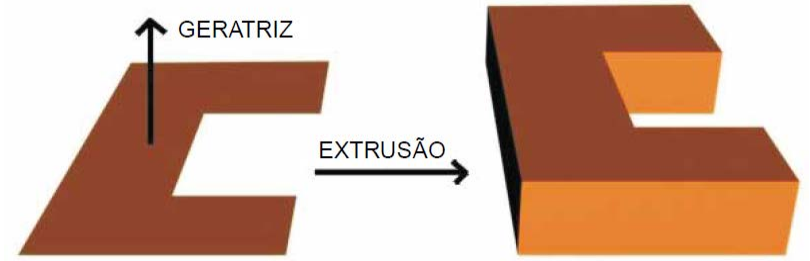
Figura 72 – Geração de superfície curva por varredura



Fonte: SCHODEK et al., 2005, p. 7.

Para criar superfícies diferentes se pode variar tanto no formato do caminho quanto do contorno. Essas opções geraram os casos especiais. Quando o caminho é a normal[90] da curva ou forma plana, é chamado de extrusão (Figura 73) e comumente usado para criar formas prismáticas. Por exemplo, ao se aplicar essa técnica no retângulo gera um paralelepípedo, em uma circunferência gera um cilindro. O nome extrusão vem da indústria de modelagem de plásticos e metais, na qual se força a matéria-prima através de um molde que assim adquiri o formato da matriz (FOLEY et al., 1990, p. 540).

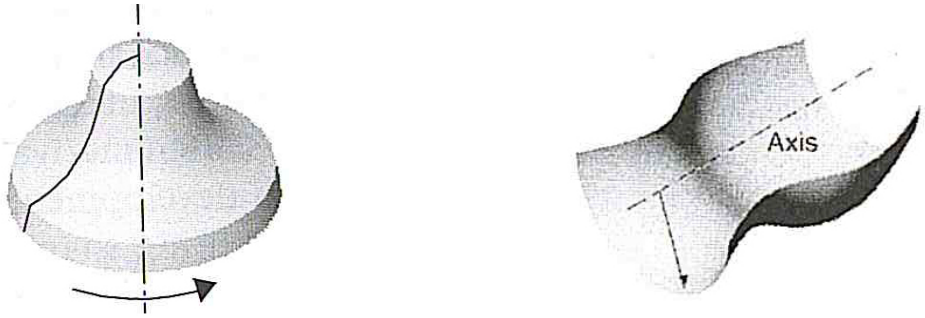
Figura 73 – À esquerda forma plana que ao sofrer a extrusão produz a superfície à direita



Fonte: AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 145.

Outro caso especial, é a revolução (Figura 74) que é análoga ao caso geométrico, na qual uma curva, chamada de perfil (ou geratriz), é rotacionada em torno de um eixo. Há alguns sistemas de modelagem que atribuem o nome *lathe* (torno mecânico) a esse método, visto que o processo de fabricação está intimamente relacionado ao processo teórico de geração (AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 146).

Figura 74 – Dois exemplos de geração de superfície por revolução



Fonte: SCHODEK et al., 2005, p. 7.

Mais outro caso especial, é a superfície regrada que é análoga ao descrito no item sobre geometria, no qual a geratriz é uma reta. Essa superfície pode ser criada por uma ou duas diretrizes. No primeiro, tem-se como exemplo o cilindróide que é obtido pelo movimento de uma reta paralela a anterior e sobre um semicírculo. No segundo, tem-se como exemplo o

[90] Reta perpendicular a uma curva ou superfície.

parabolóide hiperbólico que é criado pelo movimento de uma reta ao longo de duas retas não coplanares.

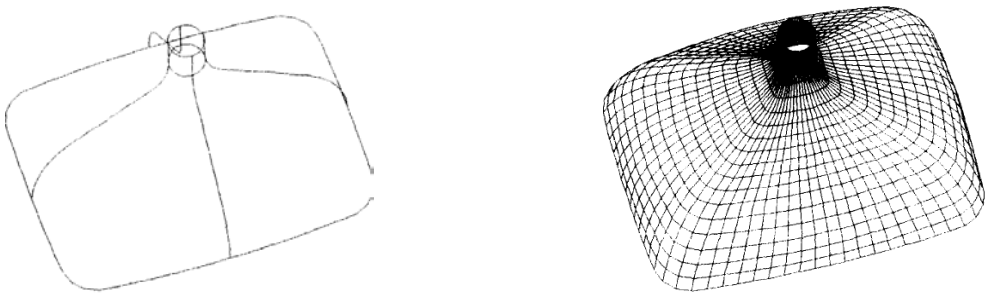
No último caso especial, se encontram as superfícies tubulares que aparecem quando o contorno é uma figura fechada. Essa situação pode gerar tanto formas mais simples como um tubo de seção quadrada semelhante aos perfis utilizados em construções metálicas, quanto mais complexas à exemplo da Figura 75. Nela uma superfície tubular foi construída pelo movimento de uma elipse (geratriz) ao longo de uma curva sinuosa (diretriz).

Figura 75 – Exemplo de geração de superfície tubular

Fonte: MITCHELL; MCCULLOUGH, 1991, p. 191.

Fora dos casos especiais, a técnica de modelagem por varredura é utilizada para criar formas mais complexas e somente programas de modelagem avançada, como os que utilizam NURBS, podem executá-la (MITCHELL; MCCULLOUGH, 1991, p. 189). Isso porque a modelagem por varredura traz mais possibilidades de modelagem do que a por seções transversais, uma vez que ela pode criar superfícies por meio não só de curvas espaciais, mas também por mais de um caminho. Um exemplo para o primeiro caso é usar a hélice, uma curva espacial[91], para criar objetos como uma mola. No segundo, tem-se o exemplo da Figura 76, que foi construída com quatro caminhos diferentes. Assim, essas duas características da modelagem por varredura possibilitam a construção de objetos mais complexos.

Figura 76 – Geração de superfície por quatro caminhos



Fonte: CHOI; LEE, 1990, p. 88.

[91] Uma curva que pode passar através de qualquer região de espaço tridimensional, em contraste com uma curva plana, que deve situar-se num único plano.

Por outro lado, ambas as técnicas possuem propriedades em comum. Destaca-se a capacidade com a qual ambas permitem o usuário a alterar as superfícies criadas por intermédio da movimentação dos pontos de controle das curvas e linhas que foram as referencias para criar as superfícies. Essa manipulação se assemelha a técnica de modelagem por forma livre.

Tendo em vista as opções de técnicas de modelagem apresentadas, percebe-se que a sua idéia básica é a criação de objetos tridimensionais complexos a partir de formas bidimensionais simples. Também que independentemente da forma criada, ela terá flexibilidade de edição.

3.2.2.2 Métodos de transformação de superfícies

Os métodos de transformação são uma parte do processo de modelagem e, comumente, aplicados após a criação de um elemento geométrico, como uma superfície, por meio de métodos descritos no item anterior. Sua aplicação permite modificar ou manipular o elemento de maneiras diferentes, mas ainda mantendo algumas características. Ou seja, preservando algumas propriedades e alterando outras. Geralmente, a transformação altera ou a posição, ou a orientação ou a forma de um objeto (MORTENSON, 1997, p. 439). Como resultado, permite tanto o refinamento da forma para atender requisitos de concepção formal quanto a criação de uma série ou uma família de um mesmo elemento geométrico. Por outro lado, a combinação entre várias transformações e elementos geométricos diferentes possibilita o agrupamento desses objetos de modo a construir modelos mais complexos (GOMES; VELHO, 1990, p. 88), a exemplo dos utilizados na Arquitetura.

Os métodos de transformação podem ser classificados em duas classes principais: geométricas (1) e de combinação (2). A primeira pode ser divida em movimentos rígidos (1a) e deformações (1b). E a segunda em operações de conjunto (2a) e *Blend* (2b). Todas serão descritas a seguir.

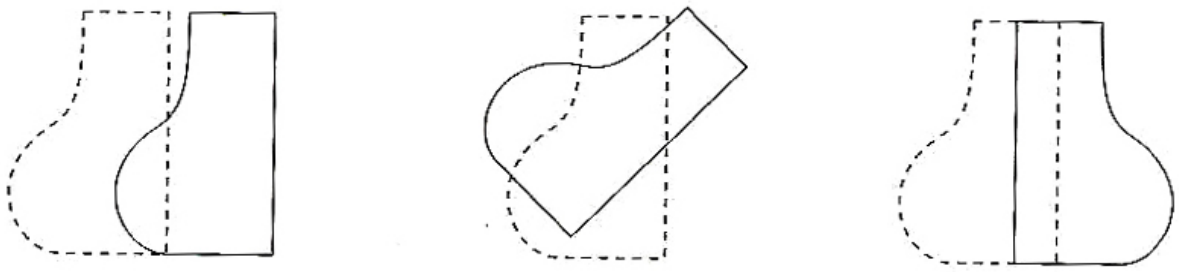
3.2.2.2.1 Transformações Geométricas

Essa técnica atua diretamente na geometria dos elementos manipulados e cada operação mantém uma propriedade geométrica invariante. Nos movimentos rígidos ou isometrias, usando o termo matemático, todas as propriedades métricas do elemento, como dimensões, ângulo, área, volume, e assim por diante, são invariantes. Assim, sua principal função é a de reposicionamento de elementos no espaço (GOMES; VELHO, 1990, p. 88). Esse grupo é

composto pela translação (*move*), rotação (*rotate*) e espelhamento (*mirror*). A translação modifica a posição, já a rotação e o espalhamento mudam a posição e a orientação do objeto.

Figura 77 – (a) translação; (b) rotação; (c) espelhamento

(a) (b) (c)

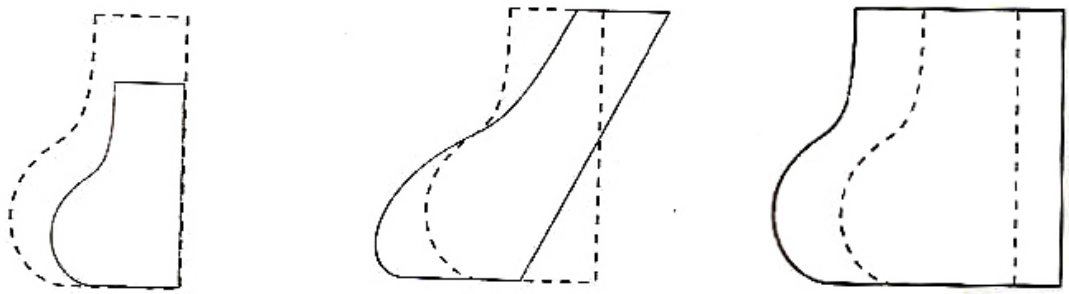


Fonte: MITCHELL; MCCULLOUGH, 1991, p. 115.

A outra classe chamada de deformações modifica a forma do elemento geométrico e é composta pelo *shear*[92] e a escala (*scale*). O primeiro (Figura 78b) é uma transformação que distorce o formato de um objeto ao tornar invariantes as distâncias entre linhas paralelas, mas não seus ângulos internos. Por outro lado, a escala (Figura 78a) ou dilatação isotrópica cria uma "cópia" da forma original, mas em tamanho diferente, ao tornar invariantes os ângulos, mas não as outras propriedades métricas. Em outras palavras, seu tamanho aumentará ou diminuirá uniformemente em todas as direções. Um caso especial de escalonamento é o *Stretch* (Figura 78c), que na Matemática é chamado de dilatação anisotrópica ou não uniforme, pois aumenta o tamanho do elemento somente em uma direção (MORTENSON, 1997, p. 462).

Figura 78 – (a) Escala; (b) *Shear*; (c) *Stretch*

(a) (b) (c)



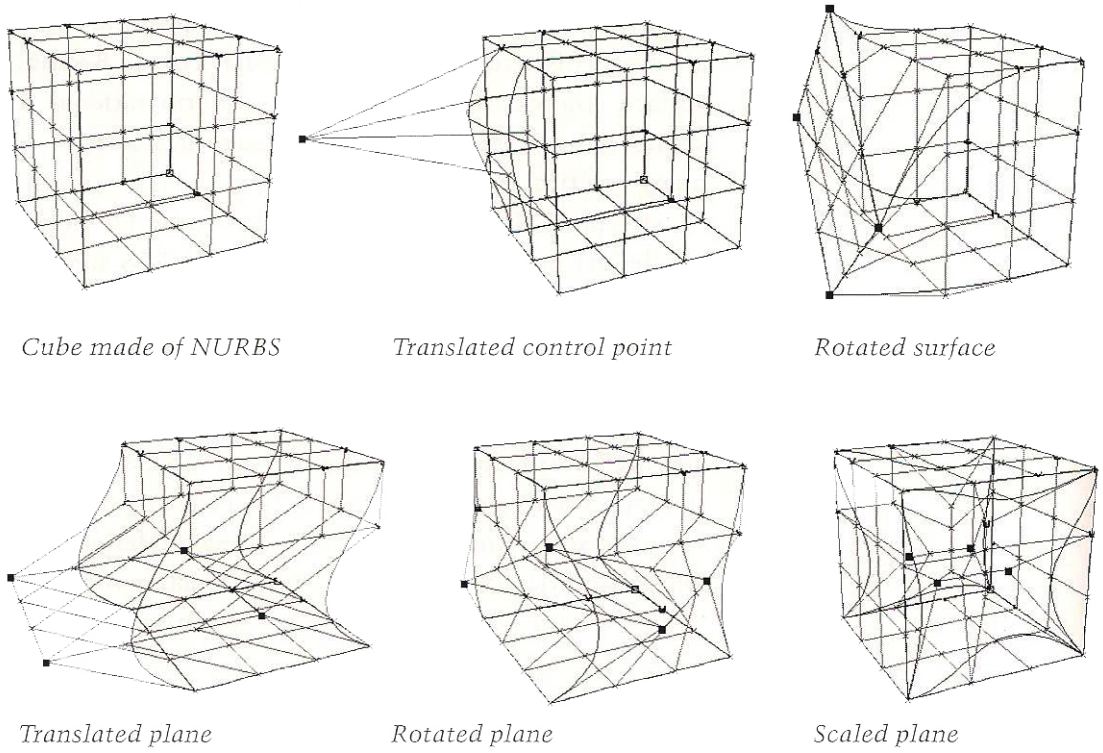
Fonte: MITCHELL; MCCULLOUGH, 1991, p.115.

Essas transformações geométricas ganharam um novo destaque com o advento da modelagem de formas livres (*free-form deformation*), visto que essas superfícies são modeladas mediante manipulação de seus pontos de controle (SAXENA, SAHAY, 2005, p. 48). Essa modelagem

[92] Termo traduzido por Azevedo e Conci (2003, p. 49) como cisalhamento.

interativa pode ser realizada ao se aplicar as transformações geométricas a um ou mais pontos de controle da superfície de forma livre pelo usuário ou por processos computacionais semi-automáticos (Figura 79). Essa técnica é creditada a Thomas W. Sederberg e Scott R. Parry em seu trabalho *Free-Form Deformation of Solid Geometric Models* de 1986 (PARENT, 2008, p. 125).

Figura 79 – Exemplos de manipulação de forma livre mediante transformações geométricas



Fonte: MITCHELL; MCCULLOUGH, 1991, p. 196.

3.2.2.2.2 Transformações de Combinação

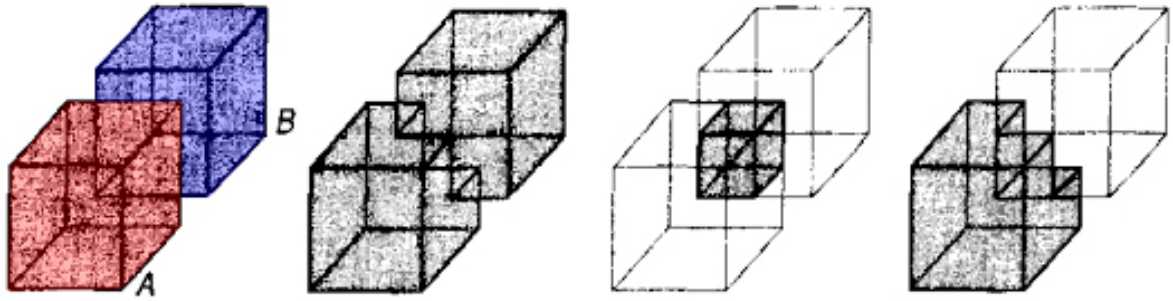
Essa técnica é aplicada em dois elementos preexistentes, ao contrário da classe anterior, com o intuito de construir representações de objetos que não podem ser descritos por somente um elemento geométrico como, por exemplo, um motor de veículo, que por ser um conjunto complexo necessita de vários elementos para ser representado. Assim, o emprego de uma transformação de combinação em dois elementos separados resulta em que esses se tornem uma entidade única (KALAY, 2004, p. 147).

Um dos métodos desse grupo chamado de operações de conjunto se utiliza das operações booleanas para combinar as primitivas geométricas (descritas no item 3.2.1.1) por intermédio de sua justaposição ou colagem ao aplicar suas três operações: união, interseção e diferença (Figura 80). Comumente, esse método é aplicado em elementos que já foram posicionados e dimensionados através de transformação geométricas e somente são aplicáveis em sólidos ou

superfícies fechadas (SAXENA, SAHAY, 2005, p. 48). Além disso, alteram tanto a sua geometria como a sua topologia.

Figura 80 – (a) Cubos A e B; (b) união; (c) interseção; (d) diferença

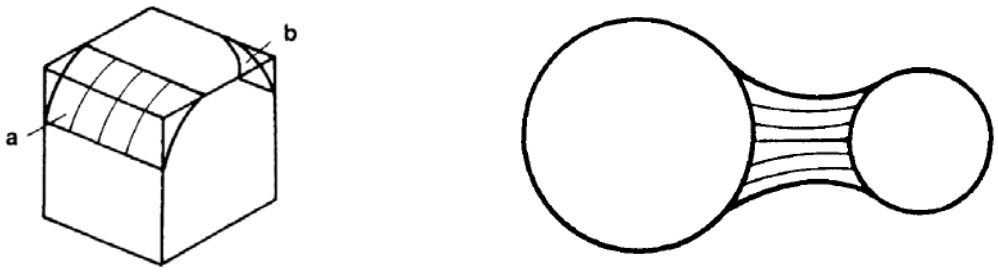
(a) (b) (c) (d)



Fonte: FOLEY et al. , 1990, p. 535.

Conforme Velho, Gomes e Figueiredo (2002, p. 78), o outro método desse grupo denominado *blend* é a combinação de duas ou mais superfícies (Figura 81c), as quais podem ou não interceptar-se, por meio de uma transição suave (*smooth*) e contínua entre essas superfícies. Em outras palavras, é como estender o conceito de continuidade geométrica de segundo grau (G^2) para superfícies ao invés de curvas como visto no item 3.2.1.1. Porém, no caso do *blend*, as superfícies geralmente não são paramétricas, mas sim implícitas, pois são matematicamente mais adequadas para essa operação.

Figura 81 – *Blend*: (a) em aresta; (b) em vértice; (c) superfície de transição entre duas esferas que não se cruzam; (c)



Fonte: VIDA; MARTIN; VARADY, 1994, 342.

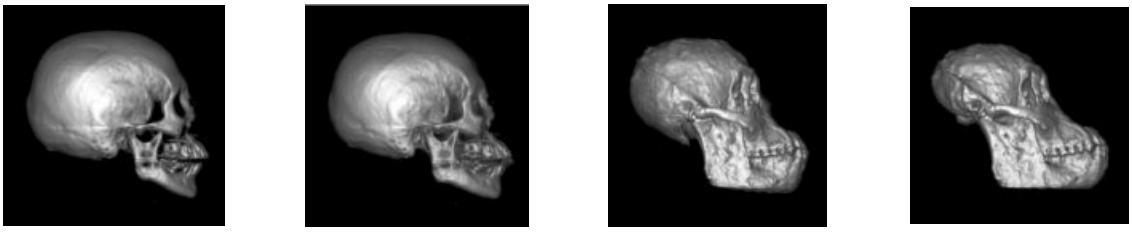
Sua aplicação dentro de programas CAD era comumente limitada à "atenuação" de quinas (Figura 81a e 81b) resultantes das operações Booleanas (CUSATIS JUNIOR, 1999, p. 9), mas nas últimas décadas percebeu-se o seu potencial para a modelagem de formas "orgânicas"[93], como por exemplo, as usadas na produção de filmes em animação computadorizada e seu uso foi difundido. Isso por que o *blend* possui versatilidade de utilização e pode ser usado de diversas maneiras, tanto que junto com a modelagem de formas livres, se tornou a base na

[93] Formas arredondadas e sem arestas, que mostram convexidades e concavidades por meio de curvas que fluem suavemente, à exemplo do corpo humano (WONG, 2001, p. 150).

qual foram construídas outras técnicas de deformação empregadas na modelagem de formas "orgânicas", como o *morphing* e o *metaball* ou *blob*.

O *morphing* é uma técnica de animação comumente usada como um efeito especial na indústria cinematográfica e é um termo usado para descrever um processo em que um objeto altera a sua forma gradualmente a fim de obter uma outra forma (TERZIDIS, 2003, p. 42). Tal técnica cria uma visualização convincente do processo no qual um objeto feito de material elástico é gradualmente transformado em outro (GOMES et al., 1999, p. 86).

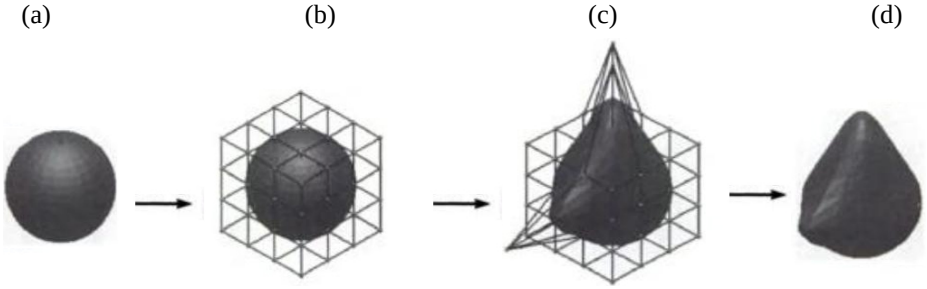
Figura 82 – Etapas de uma sequência de *morphing* entre dois objetos volumétricos



Fonte: GOMES et al., 1999, p. 85.

Para a modelagem geométrica, resumidamente, é a transformação de uma forma original (fonte) para uma forma de destino (alvo), criando uma variedade de formas intermediárias (PARK, 2005, p. 25). Numa visão mais técnica, aplica-se um *warp*[94] (Figura 83) em cada forma e cria-se a transição de uma para a outra mediante a aplicação do *blending*, que executa uma transformação contínua (ver item 3.1.6) entre os elementos correspondentes do *warp* da forma fonte e da forma alvo. Assim, pode-se dizer que o *warp* é similar a uma deformação de forma livre em um único objeto e o *morphing* é similar a uma interpolação entre dois objetos (GOMES et al., 1999, p. 86).

Figura 83 – (a) Esfera; (b) *warp* da esfera; (c) deformação da malha; (d) resultado da deformação



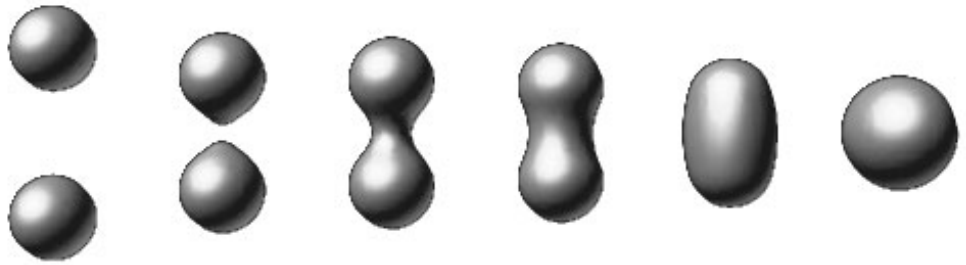
Fonte: GOMES et al., 1999, p. 383.

Metaballs (Figura 84), também conhecidos como *blob*, *soft objects* ou *isosurface*, são um tipo de técnica de modelagem implícita e, por isso, criam superfícies implícitas. Foi primeiramente criado por Geoff Wyvill, Craig McPheeters e Brian Wyvill em seu trabalho *Data Structure*

[94] Mapear as características formais de um objeto através de pontos de referência em relação a uma malha (que são coordenadas curvilíneas, ver item 3.1) sobreposta a ele (PARENT, 2008, p. 125-129).

for Soft Objects de 1986 (FOLEY et al., 1990, p. 1047). Essa modelagem cria objetos compostos por elementos que possuem a capacidade de se aglutinarem mutuamente, assim como na formação de uma molécula ao se combinar átomos. Em mais detalhes, um *metaball* é uma partícula rodeada por um campo de densidade (a sua influência), que diminui a medida que se afasta dela, mas quando mais de um campo de influencia de mais de um objetos diferentes se cruzam há a sua soma, que causa a combinação dos dois objetos através do *blending*. Essa combinação entre esses elementos é criada automaticamente pela técnica de modelagem, liberando o usuário de ter que definir explicitamente cada *blend* entre os objetos (FOLEY et al., 1990, p. 1012). A aplicação de modelagem por objetos implícitos abrange não só a modelagem de moléculas, mas também plasticina (massa de modelar) e fluídos dinâmicos (FOLEY et al., 1990, p. 1047).

Figura 84 – Sequência de aproximação de dois objetos implícitos



Fonte: GOMES; VELHO; FIGUEIREDO, 2002, p. 127.

Segundo Foley et al. (1990, p. 1011), além desses, outros métodos foram criados para atender a demanda de modelagem que está além da modelagem geométrica, mas que está geralmente voltada para a modelagem de fenômenos da natureza. Esses tipos especiais de modelagem foram agrupados pelo mesmo autor sob a denominação de Técnicas de Modelagem Avançadas e serão brevemente apresentadas no item 3.2.2.2.3.

3.2.2.2.3 Técnicas de Modelagem Avançadas

Conforme Gomes e Velho (1990, p. 150), a Modelagem Geométrica costuma ser eficaz ao descrever objetos manufaturados pelo homem, mas encontra um desafio para representar formas orgânicas e outros fenômenos naturais. Esses fenômenos são construídos por "[...] objetos com uma geometria extremamente complexa e irregular, não homogênea, não rígida e anisotrópica[95]."(GOMES; VELHO, 1990, p. 150). Como por exemplo, as plantas, os animais, as nuvens e o fogo. A representação desse tipo de fenômeno pela Modelagem Geométrica, se

[95] Característica que uma substância possui em que uma certa propriedade física varia com a direção.

possível, seria vagarosa e consumiria muito tempo, por isso é comum empregar a Modelagem Procedural como método alternativo.

A Modelagem Procedural tem como objetivo tornar simples a modelagem de fenômenos complexos, ao representá-los por meio de um único modelo que possua parâmetros de fácil ajuste e que sejam intuitivos. Para tanto, essa modelagem se concentra em criar o modelo a partir de um conjunto de regras que gerará o modelo de forma automática ou semi-automática, isto é, com menos *inputs* do usuário (FOLEY et al., 1990, p.1011).

A base de conhecimento utilizada na construção dos modelos procedurais vai além da Geometria e Topologia, incluindo em geral conhecimentos provenientes de uma área afim ao objeto real a ser modelado, por exemplo botânica, biologia, física (GOMES; VELHO, 1990, p. 151). Por isso, esses modelos representam tanto a forma quanto o crescimento e as mudanças, ou seja, o comportamento desses fenômenos, principalmente, aplicando conceitos da área de Sistemas Dinâmicos. Devido a esse conhecimento, os modelos procedurais são ativos ao contrário do modelo geométrico "clássico" que é representado por configurações estáticas e inativas (FOLEY et al., 1990, p. 1012).

Outras características dos modelos procedurais, segundo Gomes e Velho (1990, p. 154) são a base algorítmica, a recursividade, o uso de técnicas estocásticas e uso de técnicas de animação. A primeira é a descrição do conjunto de regras do modelo em forma de algoritmo, de modo a guiar as etapas de construção e transformação dos objetos. A segunda característica guia a primeira, determinando seus processos de expansão e subdivisão ao controlar o número de repetições de dada operação. A terceira possibilita a criação de variações nos modelos controladamente, ao aplicar efeitos randômicos baseados nas estatísticas de comportamento do objeto a ser modelado. A última característica proporciona uma gama de técnicas de deformações utilizadas para criar imagens em movimento, como o *morphing* do item 3.2.2.2.2.

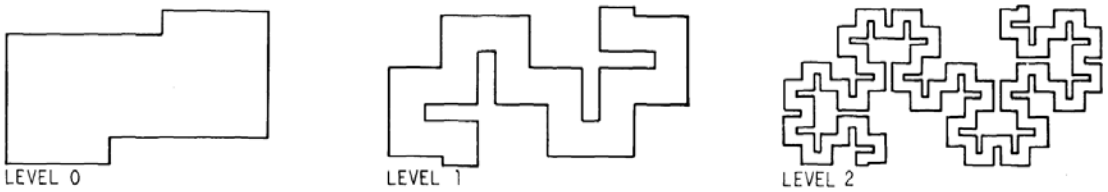
Essas características estão presentes na maioria dos tipos de modelos procedurais, dos quais os se destacam: os baseados em linguagens formais e os de simulação.

3.2.2.2.3.1 Modelos baseados em Linguagens Formais

Nesses modelos um objeto é gerado a partir de uma forma inicial na qual é aplicada uma um conjunto de regras (gramática) recursivamente. A gramática define como uma ou parte da forma existente pode ser transformada (STINY; GIPS, 1971, p. 1463). Assim, pode ser divida

em três elementos: forma inicial, regras de transformação (à escolher entre as transformações geométricas) e regra de finalização (que avisa quando para de transformar a forma inicial). Sua aplicação pode ser feita em qualquer campo no qual os objetos que estão sendo modelados exibem regularidade suficiente (FOLEY et al., 1990, p. 1030).

Figura 85 – Três níveis de aplicação da gramática à forma inicial



Fonte: STINY; GIPS, 1971, p. 1467.

De acordo com Gomes e Velho (1990, p. 154) e Foley e colaboradores (1990, p. 1027), um exemplo bem conhecido é o *Lindenmayer Systems* (LS). Em 1968, o LS foi criado pelo biólogo Aristid Lindenmayer (1925-1989) que empregou gramáticas de grafo paralelas para criar uma teoria axiomática do desenvolvimento biológico. Sua aplicação na Computação Gráfica é tipicamente para geração de padrões repetitivos, fractais e formas orgânicas naturais como plantas (GU; SINGH; MERRICK, 2010, p. 3-4).

Figura 86 – Cinco níveis de aplicação do *Lindenmayer System*

Fonte: PRUSINKIEWICZ; LINDENMAYER, 1996, p. 129.

3.2.2.2.3.2 Modelos de Simulação

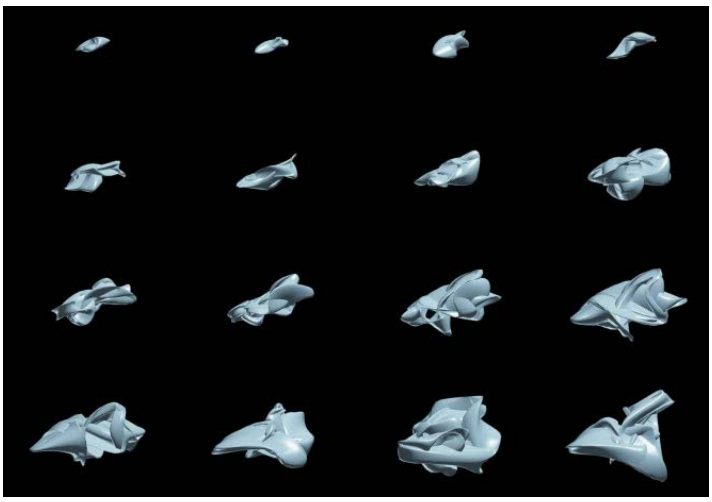
De acordo com Gomes e Velho (1990, p. 165), esses modelos representam objetos complexos ao formá-los por um conjunto de elementos simples guiados por leis reguladoras do seu comportamento e das interações entre eles que constituem um sistema, que ao ser executado mostra a evolução do modelo ao longo do tempo. Em geral, esse tipo de modelo é empregado na representação de objetos irregulares que podem ser decompostos em partículas (chuva, fogo, etc.), ou de grupos homogêneos de objetos animados (bandos de pássaros, cardumes, etc.). Dois exemplos bem conhecidos são o Sistema de Partículas e o Sistema Evolutivo.

Conforme, Foley e colaboradores (1990, p. 1031), um sistema de partícula é definido por um conjunto de partículas que se desenvolve ao longo do tempo. A evolução é determinada mediante a aplicação de certas regras probabilísticas para as partículas: podem gerar novas partículas, podem obter novos atributos dependendo da idade, ou podem morrer (desaparecer da visualização). Eles também podem se mover de acordo com quer leis deterministas ou estocásticas do movimento. Sistemas de partículas têm sido utilizados para modelar os seguintes tipos de objetos: fogo, neblina, fumaça, fogos de artifício, árvores e grama.

Essa técnica começou a ser trabalhada em 1983 por William T. Reeves com sua publicação *Particle Systems – A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects*. Ao contrário da modelagem geométrica até então, onde eram criadas formas através de objetos rígidos, essa nova técnica possibilitou gerar objetos que não tem extremidades discretas (contornos bem definidos ou rígidos) (AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 167-8).

O Sistema Evolutivo é baseado em representações computacionais análogas ao processo de evolução neo-darwinista por seleção natural. Por isso cria formas mediante um processo de recombinação, variação e seleção existentes na maioria dos processos de adaptação evolutiva. Tal técnica proporciona a criação de famílias de formas similares através de um código genético (leis reguladoras do seu comportamento), ou seja, gerar um grande número de alternativas de projeto com diferenças significativas entre eles, mas mantendo uma linguagem formal entre eles (FRAZER et al., 2002, p. 301-303). A técnica mais conhecida é o algoritmo Genético desenvolvido por John H. Holland no seu trabalho *Adaptation in natural and artificial systems*, de 1992.

Figura 87 – Forma inicial “evoluindo” para uma forma complexa



Fonte: FRAZER, 2005, p. 42.

3.3 Considerações Gerais

Ao longo da evolução do estudo das linhas e superfícies curvilíneas na Geometria, diferentes teorias e novos instrumentos foram desenvolvidos, como o conceito de curvatura e as ferramentas do cálculo diferencial, os quais se tornaram a base para novos ramos da Geometria. Essas novas "correntes", como a Geometria Diferencial e a Geometria não-Euclidiana, ofereceram mais recursos para a definição matemática, cada vez mais precisa, de formas curvas. Esse caminho em direção de maior exatidão foi representativo do momento da evolução da Matemática, no qual se buscou maior rigor em suas definições mediante a generalização[96] do seu conhecimento.

Uma dos efeitos desse movimento foi a utilização da Geometria como ferramenta de representação de modelos idealizados de objetos do mundo físico, especialmente, em ambiente computacional, ao codificar essas definições matemáticas em linguagem de programação e, assim, estabelecer a Modelagem Geométrica. Esse ramo da Ciência da Computação está na base das ferramentas computacionais aplicadas ao projeto e por isso também deram suporte ao aumento da complexidade do objeto arquitetônico, discutido no Capítulo 2. Essas formas mais complexas podem ser relacionadas às novas técnicas de modelagem, principalmente, a geração de superfícies por formas livres (*free-form*) e transformações por deformações ou geração automatizada de formas, como os modelos evolutivos. Todas as técnicas baseadas nos avanços matemáticos advindos da generalização da teoria das superfícies.

Dado o exposto, pôde-se elaborar um extenso vocabulário formado por um lado de recursos e ferramentas sobre as representações, transformações e análises de geometrias curvilíneas, e por outro lado, de uma gama de técnicas de modelagem. Esse vocabulário será utilizado tanto no Capítulo 4 para a descrição das formas dos edifícios a serem analisados, quanto no Capítulo 5, para esclarecer os procedimentos de representação dentro do programa de Modelagem Paramétrica.

---

[96] Generalização é o processo de encontrar e destacar as propriedades de toda uma classe de objetos semelhantes mediante uma declaração sobre os conceitos, isto é, um teorema (MITCHELMORE, 2002).

4 Processo de Seleção de Obras Arquitetônicas Curvilíneas

No presente Capítulo inicia-se a fase empírica da pesquisa com a aplicação direta da modelagem paramétrica de modo a ampliar os conhecimentos e o entendimento do potencial dessa modelagem na concepção arquitetônica. Esta fase é dividida em duas etapas: o panorama e o estudo. A primeira diz respeito à seleção de edifícios curvilíneos que tenham se destacado na produção arquitetônica recente, de modo a criar um repertório base de onde se procederam aos estudos e aqui apresentadas. A segunda diz respeito a modelagem de três obras escolhidas desse conjunto, de modo a exemplificar os procedimentos de modelagem paramétrica em obras arquitetônicas, como apresentado no Capítulo 5.

4.1 Critérios de seleção dos edifícios

Esta etapa consistiu nos procedimentos de seleção de uma coletânea de obras que teve como objetivo traçar um panorama das edificações de formas curvilíneas mais emblemáticas da arquitetura contemporânea.

Para a escolha desse conjunto de obras foram aplicados os seguintes critérios de seleção:

a) a abrangência temporal contempla os últimos vinte anos, contendo a produção arquitetônica do mesmo período da entrada da modelagem paramétrica no campo da Arquitetura (como discutido no Capítulo 2), compreendendo o período pesquisado de 1990 a 2010;

b) a obra arquitetônica deve pertencer ao rol daquelas que se tornaram ícones, ou seja, causaram impactos visuais pelas suas formas pouco convencionais, e são de fácil reconhecimento, mesmo por pessoas não pertencentes ao campo da arquitetura e, logo, foram amplamente divulgadas na mídia;

c) a obra arquitetônica deve possuir sua “forma geral” curvilínea, ou seja, que o formato primário de sua aparência externa seja composto por volumes curvos e superfícies curvas, e

d) foram consideradas somente obras construídas, pois, comumente, decisões de concepção formal são influenciadas[97] pela escolha dos processos construtivos. Além disso, para contemplar o critério B, a obra precisa estar construída;

[97] Um exemplo dessa influência seria os processos de racionalização da Geometria discutidos no final do item 2.1.5.

Assim, a seleção do conjunto de obras arquitetônicas de acordo com esses critérios aconteceu em dois estágios: levantamento inicial e refinamento da seleção.

4.1.1 Levantamento inicial

No primeiro executou-se uma pesquisa bibliográfica em referencial teórico sobre três temas: arquitetura contemporânea, obras emblemáticas ou icônicas e o surgimento de formas não convencionais na arquitetura. O objetivo foi se apoiar em autores referenciais para guiar a seleção das obras, visto que não é o escopo desse trabalho definir com precisão quais são as obras icônicas e/ou mais emblemáticas da arquitetura contemporânea. Para tanto foi utilizado como fonte de pesquisa livros, dos quais os mais pertinentes estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Fontes bibliográficas do levantamento

Título	Autor	Ano
Building A New Millennium: Architecture Today and Tomorrow.	Philip Jodidio	1999
New Forms: Architecture in the 1990s	Philip Jodidio	2001
Las Formas del Siglo XX	Josep Maria Montaner	2002
The New Paradigm in Architecture: The Language of Post-Modernism	Charles Jencks	2002
Arquitetura Contemporânea: Uma História Concisa	Diane Yvonne Ghirardo	2002
Iconic Building	Charles Jencks	2005
A Arquitetura no Novo Milênio	Leonardo Benévolo	2007
Architectural Excellence: 500 iconic buildings	Paul Cattermole	2008
Sistemas arquitectónicos contemporáneos	Josep Maria Montaner	2008

Fonte: própria autora

Desse estudo foram retirados termos e/ou expressões que traduziam a idéia geral dos tipos de obras procuradas no contexto da arquitetura contemporânea. Esses termos foram decompostos em substantivos e adjetivos, que foram combinados em novas expressões, mantendo a estrutura da língua, apresentadas no Quadro 4. O objetivo foi empregar essas expressões como palavras-chave de sistemas de busca em bases de dados, assim ampliando as fontes de coleta de dados e, consequentemente, buscando maiores informações sobre o tema. Utilizou-se como fonte de pesquisa o banco de teses do portal da CAPES, o portal Domínio Público e revistas eletrônicas.

Quadro 4 – Termos e/ou expressões utilizadas na pesquisa

Adjetivos	Substantivos		
	Buildings/obras/edifícios	Architecture/arquitetura	Landmark/marco
Iconic/icônico(a)	Iconic Buildings Obras icônicas Edifícios icônicos	Iconic Architecture Arquitetura icônica	Iconic landmark Marco icônico
Famous/famoso(a)	Famous Buildings Obras famosas Edifícios famosos	Famous Architectutre Arquitetura famosa	Famous landmark Marco famoso
Great	Great Buildings	Great Architecture	Great landmark
Key	Key Buildings	Key Architecture	Key landmark
Distinguished Emblemático(a)	Distinguished Buildings Obras Emblemáticas Edifícios Emblemáticos	Distinguished Architecture Arquitetura Emblemática	Distinguished landmark
Contemporary/ Contemporâneo(a)	Contemporary Buildings Obras contemporâneas Edifícios contemporâneos	Contemporary Architecture Arquitetura contemporânea	Contemporary landmark Marco contemporâneo
Top	Top Buildings	Top Architecture	Top landmark
Star Signature	Signature Buildings	Star Architecture Signature Architecture	Star landmark
Unconventional Strange	Unconventional Buildings Strange Buildings	Unconventional Architecture Strange Architecture	Unconventional landmark Strange landmark
Blob Curvilíneo(a)	Blob Buildings Obras Curvilíneas Edifícios Curvilíneos	Blob Architecture Arquitetura Curvilínea	Blob landmark Marco Curvilíneo

Fonte: própria autora

Cruzando-se as informações das buscas com o referencial teórico baseado nas obras selecionadas sobre o tema, e com os critérios estabelecidos no item 4.1, foi realizada uma triagem preliminar que abrangia um grande número de obra. Esse conjunto foi julgado extenso e incompatível com a dimensão desse trabalho de mestrado, por isso decidiu-se por um refinamento da seleção que será apresentada a seguir.

4.1.2 Refinamento da Seleção

Para refinar a coletânea preliminar de obras foram aplicados outros critérios de seleção, mas sem a obrigatoriedade de possuir todos, ou seja, possui pelo menos um dos seguintes itens:

a) Grande disponibilidade de informação sobre a obra em idiomas dominados pela autora;
b) Acesso a todo ou a partes do conjunto documental do projeto da obra arquitetônica;
c) Acesso a todo ou a partes do processo de concepção da obra arquitetônica e se houve a utilização de ferramentas computacionais nele, e

d) Limite de vinte obras;

O objetivo deste refinamento foi ampliar os dados sobre as obras, de modo a permitir a viabilização das experiências. Para tanto, usou-se fontes mais específicas sobre projetos e os arquitetos que os conceberam. Os tipos de fontes de pesquisa foram livros (apresentados no Quadro 5), revistas impressas, revistas eletrônicas (apresentadas no Quadro 6) e bases de dados internacionais, a saber, o *Cumulative Index of Computer Aided Architectural Design* (CumInCAD).

Quadro 5 – Livros utilizados no refinamento

Livros		
Título	**Autor**	**Ano**
Architecture Now! v. 2.	Philip Jodidio	2003
The Phaidon Atlas of Contemporary World Architecture	Phaidon Press	2004
Architecture, Technology and Process	Chris Abel	2004
Architecture Now! v. 3.	Philip Jodidio	2005
Designing with Glass: Great Glass Buildings	Peter Hyatt; Jenny Hyatt	2006
1000X European Architecture	Joachim Fischer	2007
The Phaidon Atlas of 21st Century World Architecture	Phaidon Press	2008
Transparent Plastics	Simone Jeska	2008
Architecture Now! v. 6.	Philip Jodidio	2009
The New Mathematics of Architecture	Jane R. Burry; Mark C. Burry	2010

Fonte: própria autora

Quadro 6 – Revistas utilizadas no refinamento

Revistas Impressas	
Título	**Local**
Revista Projeto Design	São Paulo, Brasil
Revista Arquitetura e Urbanismo	São Paulo, Brasil
El Croquis	Madrid, Espanha
Revistas Eletrônicas	
Título	**Local**
The Arup Journal	Londres, Inglaterra
Architectural Record	New York, Estados Unidos
AECbytes	[S.l]
Architectureweek	Eugene, Estados Unidos
Architectural Review	Londres, Inglaterra
Architect’s Journal	Londres, Inglaterra

Fonte: própria autora

A seleção de obras resultantes está apresentada no Quadro 7, que mostra cinco informações básicas das mesmas, nesta ordem: título da obra, o arquiteto autor do projeto, ano do término da construção, ferramenta computacional utilizada para gerar a forma, sua localização e classificação da forma de acordo com o item 3.1.7. Cada informação será inserida numa coluna do quadro que será organizado em ordem cronológica crescente.

Deve-se destacar que não foram selecionadas obras depois do ano de 2005, em virtude do reduzido acesso a publicações tão recentes, devido à proximidade temporal da conclusão de sua construção e, também, por serem recentes ainda não foram amplamente divulgadas na mídia não especializada.

A descrição mais detalhada dessa coletânea de obras arquitetônicas que apresentam um panorama das obras curvilíneas mais emblemáticas dos últimos anos será apresentada no próximo item.

Quadro 7 – Lista de obras selecionadas para a coletânea

	OBRA	ARQUITETO	ANO	FERRAMENTA	LOCAL	FORMA
1	Nationale-Nederlanden Building	Frank Gehry	1996	CATIA	Praga, República Tcheca	Cilindro e superfície curva genérica
2	Pavilhão FreshH2Oexpo	NOX	1997	AutoCAD 11	Zeelan, Holanda	Superfície de varredura com base em eplipses
3	Museu Guggenheim de Bilbao	Frank Gehry	1997	CATIA	Bilbao, Espanha	Superfícies desenvolvíveis derivadas da deformação de prismas
4	Centro de Mídia Natwest	Future Systems	1999	-	Londres, Inglaterra	Elipsóide seccionado
5	Bubble BMW Pavilion	Fraken\architekten	1999	Maya	Frankurft, Alemanha	Dois elipsóide unidos por transição *smooth* (*metaball*)
6	Sala de conferências do Banco DZ	Frank Gehry	2000	CATIA	Berlin, Alemanha	Superfície curva genérica
7	Quadracci Pavilion	Santiago Calatrava	2001	-	Milwaukee, EUA	Formas ovais, piramidais e seção de parabolóide hiperbólico
8	Eden Project	Nicholas Grimshaw	2001	Modelagem geométrica	Cornwall, Inglaterra	Cúpulas geodésicas
9	Prefeitura de Londres	Foster and Partners	2002	Microstation	Londres, Inglaterra	Elipsóide inclinado
10	Complexo Esplanade	DP Architects	2002	Microstation	Singapura, Singapura	Superfície curva de dupla curvatura
11	Loja Selfridges de Birmingham	Future Systems	2003	Rhinoceros	Birmingham, Inglaterra	Superfície curva genérica
12	Museu Kunsthaus de Graz	Peter Cook	2003	Rhinoceros	Graz, Áustria	Superfície curva genérica
13	Disney Concert Hall	Frank Gehry	2003	CATIA	Los Angeles, EUA	Superfícies desenvolvíveis derivadas da deformação de prismas
14	Auditório de Tenerife	Santiago Calatrava	2003	-	Santa Cruz de Tenerife, Espanha	Cilindróide, cone seccionado, triângulos esféricos
15	30 St. Mary Axe	Foster and Partners	2004	Generative components	Londres, Inglaterra	Forma ogival
16	Centro musical Sage de Gateshead	Foster and Partners	2004	Microstation	Gateshead Quays, Inglaterra	Combinação de três *metaballs*
17	Torre Agbar	Jean Nouvel	2004	-	Barcelona, Espanha	Forma ogival
18	HSB Turning Torso	Santiago Calatrava	2005	-	Malmö, Suécia	Cilindro, cilindróide e prisma deformado
19	Estádio Allianz Arena	Herzog & de Meuron	2005	CATIA	Munique, Alemanha	Torus deformado e seccionado
20	Loja Peek & Cloppenburg de Colônia	Renzo Piano	2005	Modelagem paramétrica	Colônia, Alemanha	Superfície curva genérica com secção eliptica

Fonte: própria autora

4.2 Uma Visão Panorâmica dos Edifícios Curvilíneos da Arquitetura Contemporânea

Nesse item serão apresentadas as obras selecionadas conforme descrito nos itens anteriores. Elas serão descritas focando-se nos aspectos de sua “forma geral”, especialmente, os que são curvilíneos e apoiando-se nos conhecimentos sobre formas curvas, levantados no Capítulo 3. Outras informações, como tipologia, localização e aplicação de ferramentas computacionais, serão abordadas para completar o entendimento sobre a obra.

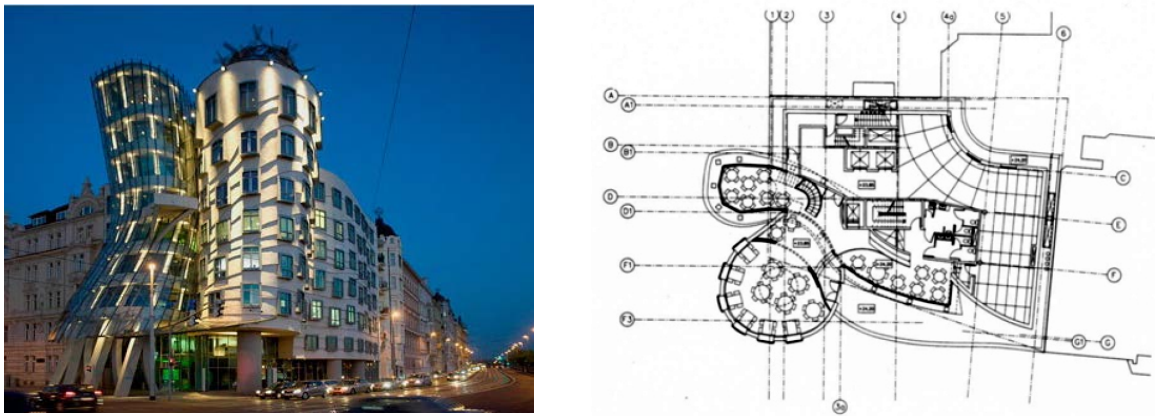
Deve-se destacar que o presente trabalho não possui como objetivo discutir ou realizar juízo sobre os valores estéticos dessas obras, por isso se aterá a análise desses projetos do ponto de vista geométrico, apoiando-se, sempre que possível, em formas clássicas ou casos especiais da Geometria e processos de geração de formas.

4.2.1 Nationale-Nederlanden Building

O edifício de escritórios chamado *Nationale-Nederlanden Building* está localizado no bairro onde estão situadas as edificações históricas de Praga na República Tcheca. Sua localização se faz em terreno de esquina ao longo do rio Vltava. Foi projetado pelo arquiteto Frank O. Gehry em cooperação com arquiteto local Vlado Milunic no ano de 1992. A edificação possui um formato distinto e é frequentemente citada como "Fred e Ginger", *Dancing House* ou *Dancing Building*. Isso porque, supostamente, evoca a imagem de um homem e uma mulher dançando, neste caso referenciando os famosos dançarinos, que são representados pelas duas torres da fachada.

Figura 88 – Nationale-Nederlanden Building: (a) vista da fachada mostrando as duas torres; (b) planta baixa

(a) (b)



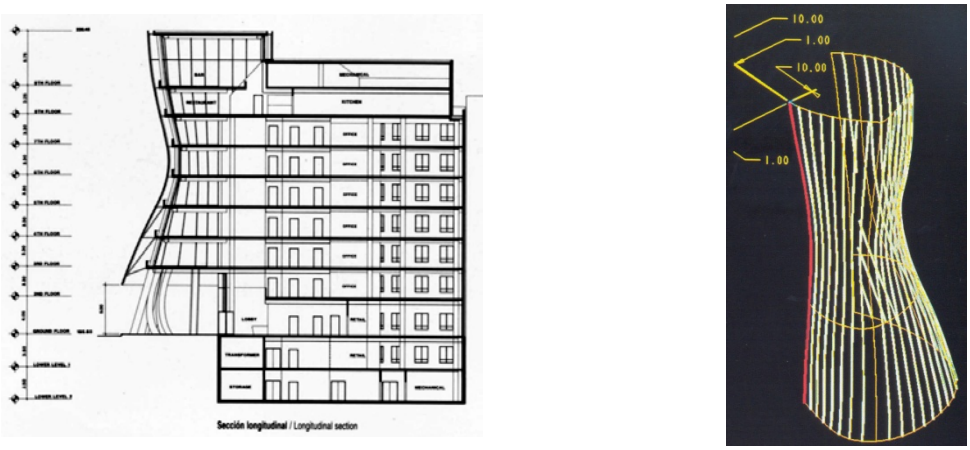
Fonte: NATIONALE …, 2003, p. 91.

Em maiores detalhes, a sua proposta formal é composta de três elementos: um bloco e duas torres diferentes entre si (Fred e Ginger). O primeiro possui o formato aproximado do terreno

em planta, pois ocupa quase todo seu perímetro, enquanto as torres se encontram na periferia do bloco e sobre a esquina do terreno (Figura 88b). A torre Fred é cilíndrica e feita de concreto pré-moldado, ao passo que a torre Ginger é composta por uma cortina de vidro e possui uma forma exterior irregular e curvilínea. Essa torre tem aparência similar a um cilindro deformado, com as extremidades em maior tamanho do que o meio e com seção longitudinal em forma de linha sinuosa de pequena curvatura (Figura 89a).

Figura 89 – Nationale-Nederlanden Building: (a) corte longitudinal; (b) modelo geométrico no CATIA

(a) (b)



Fonte: (a) NATIONALE …, 2003, p. 91; (b) RAGHEB, 2001, p. 177.

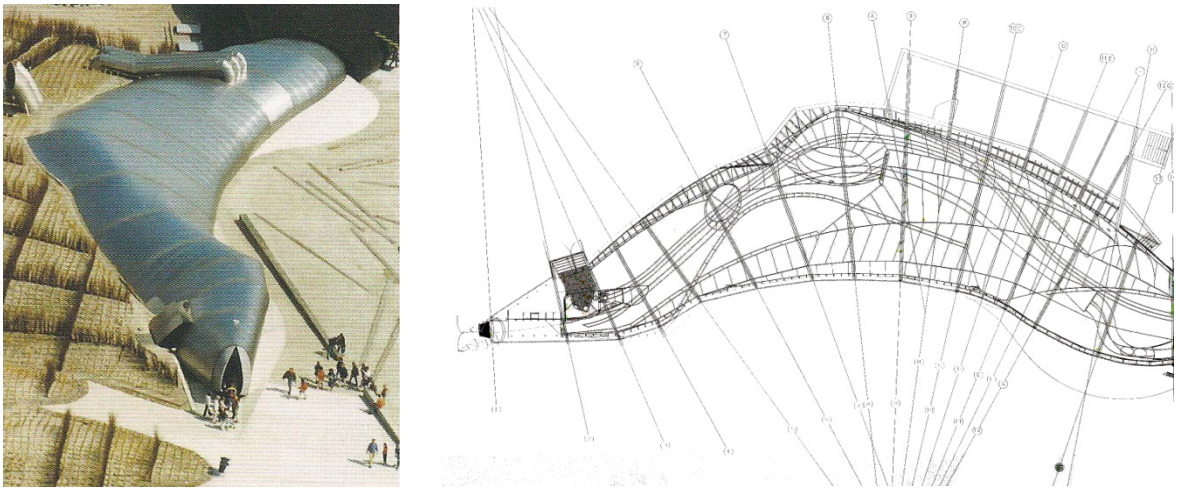
Conforme Schodek (2005, p. 43), o volume da torre Ginger dificultou a execução do seu projeto e da sua construção, por conter curvas complexas tanto em planta quanto em corte. Para resolver esse problema, o arquiteto se baseou no conhecimento adquirido no projeto da escultura de Peixe em Barcelona, onde desenvolveram ferramentas e técnicas não só para modelar elementos de construção curvos no CATIA, mas como para fabricar partes do edifício com tecnologia CAD/CAM. Foi aplicado um processo de desenvolvimento do projeto mediante uma intercalação entre modelos físicos e modelos geométricos, possibilitado pela digitalização tridimensional e pelo emprego de uma máquina de fresa para fabricar as maquetes. Na construção do edifício somente foram usadas tecnologias de Fabricação Digital para produzir os painéis de vidros não padronizados da torre Ginger diretamente dos modelos computacionais (KOLAREVIC, 2003, p. 33). Apesar disso, todo o processo de construção se tornou mais preciso e eficiente ao ser guiado pelas informações geradas pelos modelos geométricos (SCHODEK, 2005, p. 43), tanto que a construção durou apenas dois anos, começando em 1994 e terminando em 1996.

4.2.2 FreshWater Pavilion

O pavilhão FreshWater (água doce) está situado na ilha de Neeltje Jans no sudoeste da Holanda e foi concebido para abrigar uma instalação interativa sobre a importância da água doce para a *H2O Expo* da empresa *WaterLand* em associação com o Ministério Holandês do Transporte, Obras Públicas e Gestão da Água (SILVA, 2004). Para abordar tal assunto o escritório holandês NOX decidiu, durante o desenvolvimento desse projeto em 1993, expressar o tema por meio de um ambiente interativo com uso de recursos eletrônicos. Essa interação acontece mediante sensores e botões espalhados pelo edifício, e são controlados por um sistema computacional que produz imagens e sons de acordo com a movimentação dos usuários (SPUYBROEK, 2004, p. 34).

Figura 90 – FreshWater Pavilion: (a) vista aérea; (b) planta baixa

(a) (b)

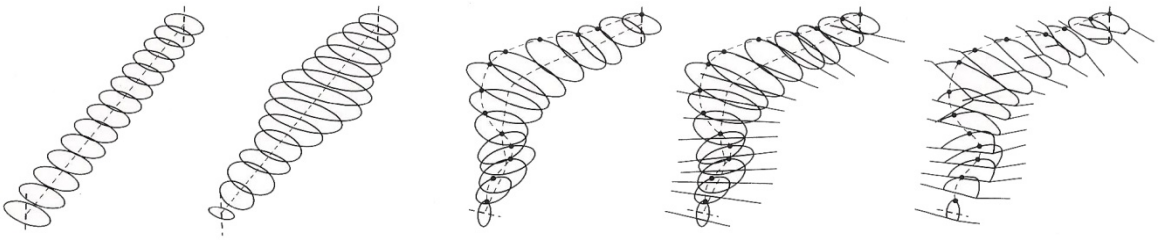


Fonte: SPUYBROEK, 2004, p. 25.

A forma externa do pavilhão (Figura 90a) é uma grande superfície que apresenta curvas em sentidos diversos. De acordo com Spuybroek (2004, p. 18), ela foi criada a partir de 14 elipses distribuídas ao longo de uma reta de 65 metros (Figura 91a) que cruzava o ponto de encontro dos eixos internos das elipses, formando visualmente um tubo. Depois, foram escaladas para se ajustar ao programa do edifício e teve como resultado um aumento gradual de tamanho das elipses que crescem do começo para o meio da reta para em seguida diminuírem até o final (Figura 91b).

Figura 91 – Sequência de modelagem da forma externa do FreshWater Pavilion

(a) (b) (c) (d) (e)

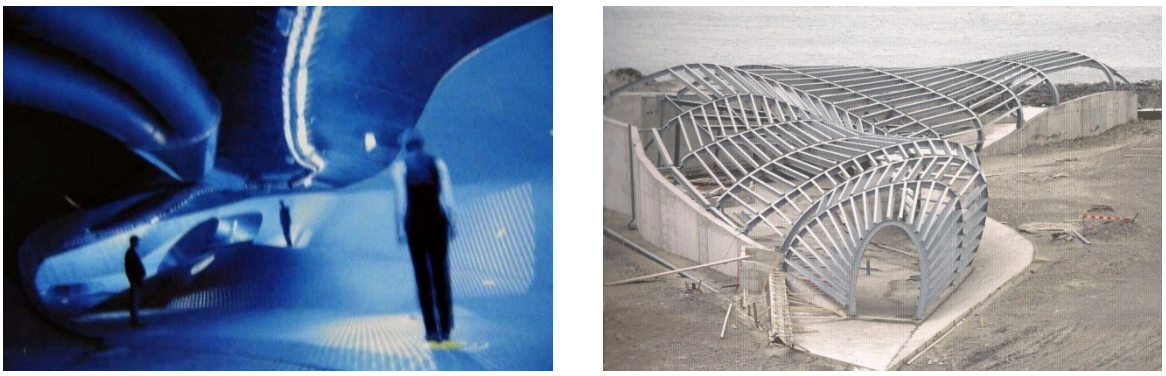


Fonte: SPUYBROEK, 2004, 19.

A seguir, a reta é deformada em uma curva de acordo com critérios da situação do edifício no terreno e as elipses acompanham as modificações (Figura 91c). Logo após, os níveis do terreno são inseridos e representados por retas que se tornam guias para seccionar as elipses (Figura 91d). Uma dessas partes é apagada, resultando em arcos elípticos (Figura 91e), nos quais se basearam a estrutura do edifício. Por fim, cada arco foi ligado ao seguinte por vigas retas (Figura 91b) para simplificar a cobertura, de uma superfície de dupla curvatura para uma regrada. Interiormente, o pavilhão mantém a temática curva ao realizar à fusão de parede, piso e teto por uma superfície única e contínua (Figura 92a).

Figura 92 – FreshWater Pavilion: (a) interior do edifício; (b) estrutura metálica

(a) (b)



Fonte: SPUYBROEK, 2004, p. 39 e 23.

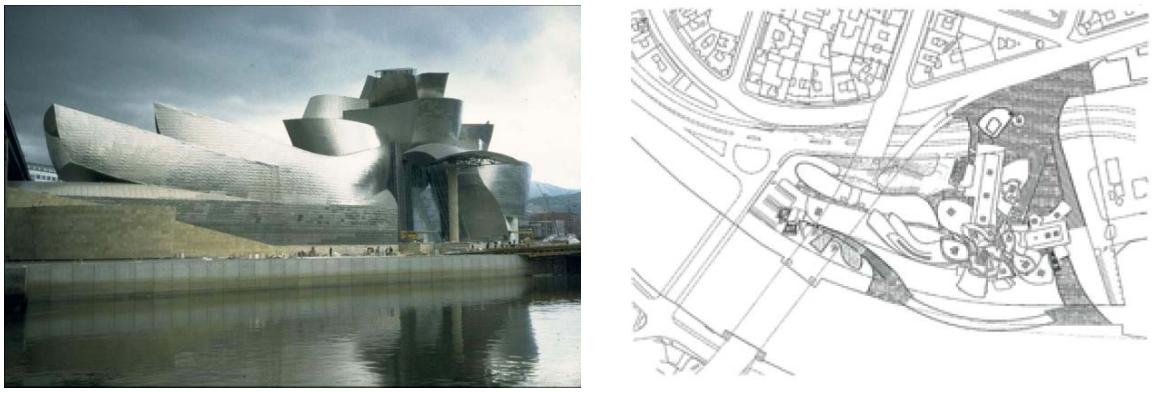
Todo esse processo foi modelado no AutoCAD 11, onde cada elipse e seus arcos somente podiam ser construídos por segmentos de círculos. Essa situação não se tornou um problema, pois o maquinário usado para produzir a estrutura também trabalhava da maneira similar (SPUYBROEK, 2004, p. 22). A estrutura em arcos de aço em perfil “I” é revestida com placas de madeira compensada forrada com chapas de aço galvanizado e tecido metalizado. A construção foi finalizada em 1997.

4.2.3 Museu Guggenheim de Bilbao

O Museu Guggenheim de Bilbao está localizado no bairro que há uma concentração de um diverso número de instituições culturais dessa cidade espanhola. Sua localização se faz em terreno triangular ao longo do rio Nervión (Figura 93b) e próxima a uma das entradas da cidade. O museu foi projetado pelo arquiteto Frank O. Gehry, em 1991, quando ganhou o concurso realizado pelo conselho da cidade, o qual fazia parte do programa de estímulo ao crescimento econômico da região. Esse programa teve grande sucesso, em parte, devido às características formais singulares do museu e, ao redor mundo, foi encarado como uma estratégia eficaz para atrair visitantes, e consequentemente, investimentos para a cidade que construísse arquiteturas esculturais ou icônicas: o chamado "efeito bilbao" (JENCKS, 2005, p. 135). O que divulgou ainda mais o museu de Bilbao, contribuindo para torná-lo uma das mais conhecidas obras arquitetônicas dos últimos anos.

Figura 93 – Museu Guggenheim de Bilbao: (a) vista da fachada a partir do rio; (b) planta de situação

(a) (b)

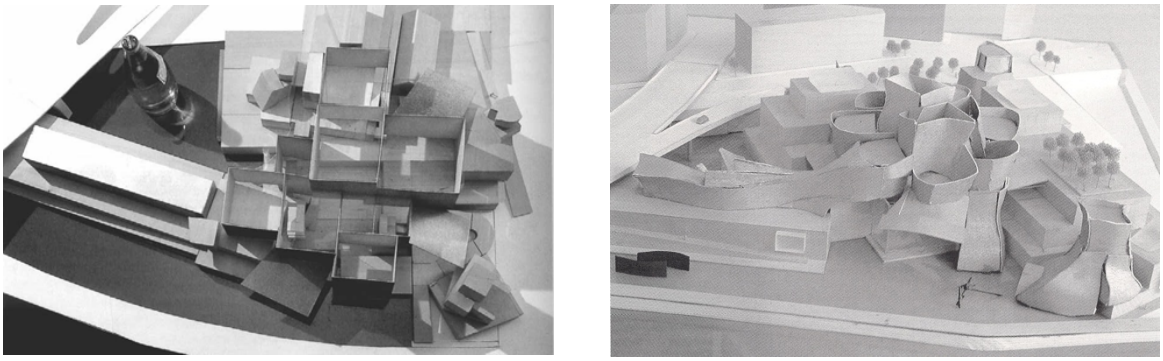


Fonte: (a) KOLAREVIC, 2003, p. 75; (b) SLESSOR, 1997, p. 35;

O formato do museu é proveniente do vocabulário formal próprio do escritório de Gehry, que foi desenvolvido mediante sucessivos estudos de formas curvas ao longo de uma série de projetos. Esse vocabulário é formado por superfícies e volumes curvos, comumente derivados da deformação de prismas, que são combinados para criar uma massa volumétrica irregular e complexa (JENCKS, 2002, p. 250). No caso do museu, esse procedimento foi repetido, uma vez que os primeiros estudos começaram com a utilização de caixas de papel (Figura 94a), sobre as quais foram se desenvolvendo deformações (Figura 94b).

Figura 94 – Estudos volumétricos do museu: (a) primeira versão em papel; (b) versão após deformação

(a) (b)

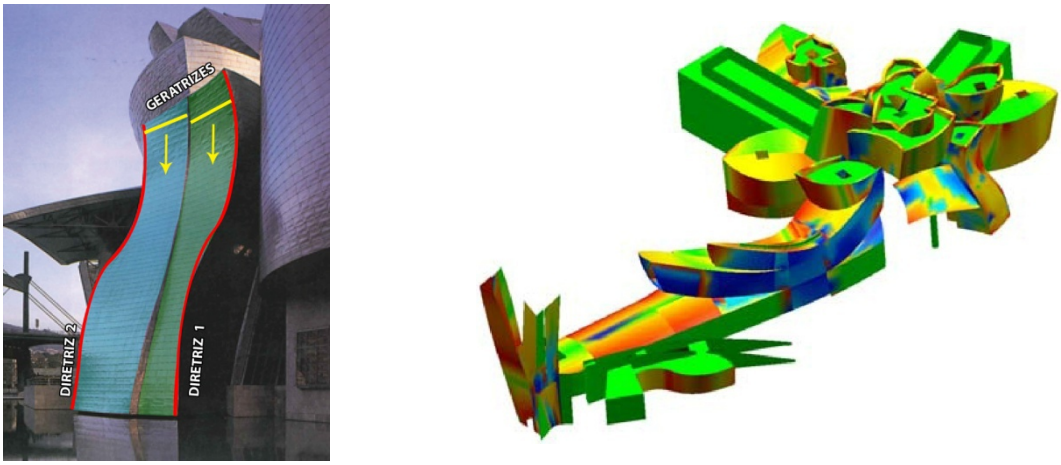


Fonte: (a) OSMAN, 2001, p. 48; (b) LINDSEY, 2001, p. 42;

Igualmente, essas deformações foram desenvolvidas por meio de pesquisas que conforme Shelden (2002, p. 157-195), resultaram em regras de construções de superfícies, as quais foram inseridas como *constraints* na ferramenta de modelagem paramétrica CATIA, utilizada pelo escritório. As duas regras mais utilizadas são a limitação de aplicação de superfícies somente as desenvolvíveis ou as regradas[98], que resultou em um amplo emprego de superfícies de varredura[99], que pode ser percebido nas formas do museu (Figura 95a). Um artifício criado para checar a validade dessas regras é a análise computacional da curvatura gaussiana[100] (k) das formas criadas, uma vez que superfícies de $k = 0$ são desenvolvíveis. Na Figura 95 (b), que mostra essa análise, vermelho é atribuído a um valor positivo de curvatura Gaussiana, verde é atribuído a zero, e azul para um valor negativo.

Figura 95 – Museu Guggenheim de Bilbao: (a) superfícies de varredura na forma do museu; (b) análise da curvatura gaussiana das superfícies

(a) (b)



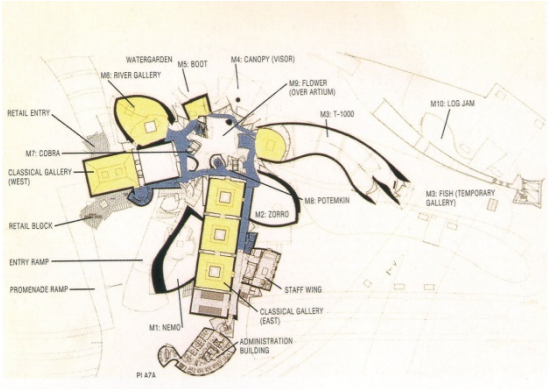
Fonte: (a) SLESSOR, 1997, p. 34; (b) SHELDEN, 2002, p. 198.

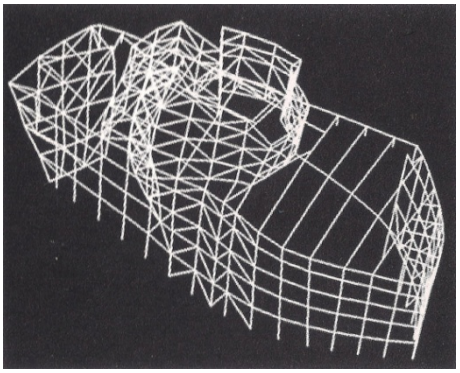
[98] Ver mais detalhes sobre superfícies desenvolvíveis e regradas no item 3.1.1.
[99] Ver mais detalhes sobre criação de superfícies de varredura no item 3.2.2.1.4.
[100] Ver maiores detalhes sobre curvatura gaussiana no item 3.1.2, sobre o Cálculo Infinitesimal e a Geometria Diferencial.

Em uma visão geral, a proposta formal do museu pode ser descrita como um formato horizontal e radial, gerado pela justaposição e sobreposição de aproximadamente vinte volumes de diferentes formatos e tamanhos (JENCKS, 2002, p. 251), os quais possuem como centro, o átrio do museu. Essa composição possui uma grande complexidade e dificulta a legibilidade de suas formas, visto que cada volume não pode ser identificado como uma forma clássica ou um caso especial da Geometria. Tanto que para orientar os construtores, os volumes curvos receberam nomes como Cobra, Nemo, Boot, Potemkin, entre outros (Figura 96a) (JENCKS, 2002, p. 251). Mesmo assim, pode-se identificar facilmente dois volumes prismáticos, e um volume curvo e linear de maior tamanho.

Figura 96 – Museu Guggenheim de Bilbao: (a) esquema ilustrativo da identificação dos volumes; (b) modelo geométrico do sistema estrutural

(a) (b)





Fonte: (a) JENCKS, 2002, p. 256; (b) LINDSEY, 2001, p. 45.

O sistema estrutural (Figura 96b) foi concebido a partir do modelo geométrico do museu e tendo como guia a sua superfície externa, ou seja, trabalhando de fora para dentro. Esse procedimento, chamado de "*skin in*" pelos arquitetos do escritório de Gehry, se baseou no conhecimento adquirido de outros projetos com o *Nationale-Nederlanden Building* (LINDSEY, 2001, p. 37).

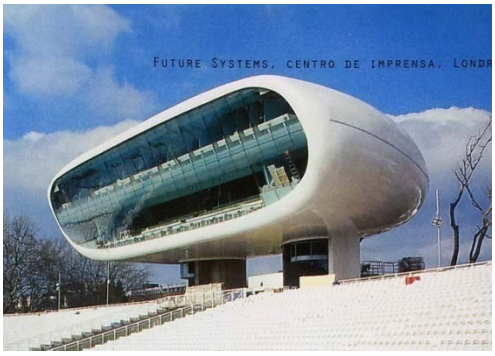
A construção do museu foi finalizada em 1997 e conduzida utilizando-se recursos de fabricação digital[101], que possibilitou a produção de elementos não padronizados de uma maneira rápida e num valor acessível (KOLAREVIC, 2003).

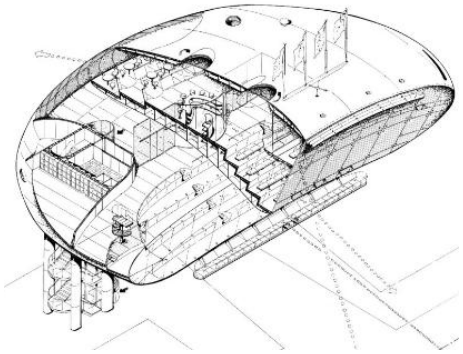
[101] Ver mais detalhes sobre Fabricação Digital no item 2.1.5.

4.2.4 Centro de Mídia Natwest

Figura 97 – Centro de Mídia Natwest: (a) vista da fachada; (b) esquema ilustrando corte parcial em perspectiva axonométrica

(a) (b)

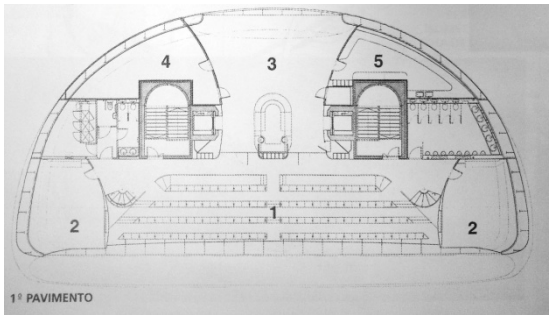


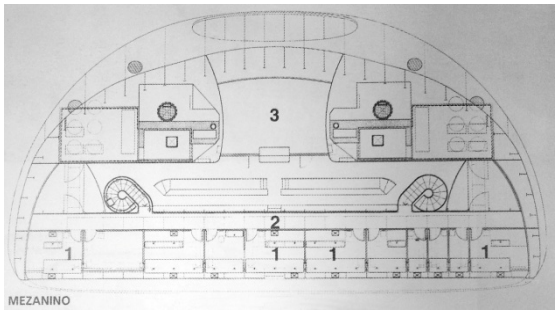


Fonte: (a) LEVETE; KAPLICKÝ, 2000, p. 79; (b) HYATT; HYATT, 2006, 164-165.

O Centro de Mídia Natwest é um edifício de aparência futurista que fornece aos jornalistas e comentaristas uma vista aérea do jogo que acontece no campo do clube de cricket Marylebone em Londres, Inglaterra. Projetado em 1993 pelo escritório de arquitetura *Future Systems* que propôs uma forma similar a um elipsóide[102] com o menor semi-eixo bem curto e seccionado ao meio por um plano inclinado, essa secção é a área envidraçada do edifício. Essa forma arredondada é compatível com vocabulário formal dos exemplares da Blobitecture[103].

Figura 98 – Centro de Mídia Natwest: planta baixa do 1º pavimento e do mezanino





Fonte: LEVETE; KAPLICKÝ, 2000, p. 81.

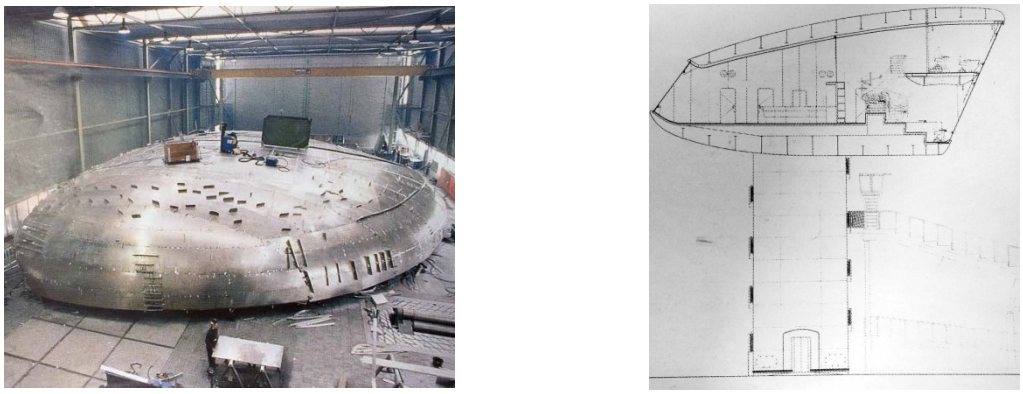
Segundo Cattermole (2008, p. 454), esse é o primeiro edifício todo em alumínio e em estrutura *semi-monocoque* (semi-monocasco). Com esse método de construção o interior ficou livre de pilares, assim oferecendo uma vista desobstruída do seu interior. De acordo com Kolarevic (2003, p. 9), tal estrutura é comumente utilizada pelos fabricantes de carros, barcos e aviões, tanto que o Centro de Mídia Natwest foi inteiramente pré-fabricado em um estaleiro (ver Figura 99a). Depois, foi levado ao local de construção e apoiado sobre duas torres de

[102] Ver item 3.1.1, sobre superfícies curvilíneas.
[103] Ver maiores detalhes no item 2.1.5, sobre o desenvolvimento do CAD na década de 1990.

concreto armado, destinadas à circulação vertical (ver Figura 99b). Todo esse processo de construção foi finalizado em 1999.

Figura 99 – Centro de Mídia Natwest: (a) edifício sendo construído no estaleiro; (b) corte transversal

(a) (b)



Fonte: LEVETE; KAPLICKÝ, 2000, p. 80.

4.2.5 Bubble BMW Pavilion

O Bubble foi um pavilhão da empresa BMW no Salão Internacional de Automóvel de 1999 em Frankfurt, Alemanha. A obra foi projetada em 1998 por Bernhard Franken junto com a ABB Architekten, ambos vencedores do concurso promovido pela BMW. O edifício teve sua forma inspirada em uma gota de água, por isso o apelido de "bolha" (*bubble*), de modo a ser um marco da tecnologia automotiva baseada em hidrogênio que foi tema da BMW nessa exposição.

Figura 100 – Bubble BMW Pavilion: vista da fachada, mostrando a volumetria

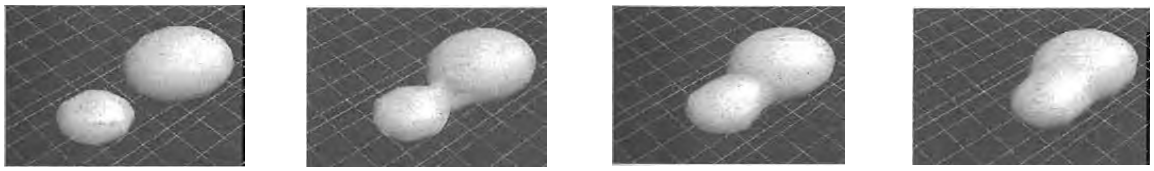
Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 21.

Tal forma foi criada pelo uso da modelagem geométrica por *metaball*[104] no programa Maya (Figura 101), a partir de duas esferas (uma maior que a outra) que representavam uma gota de água cada uma e que foram aproximadas uma da outra para criar a superfície de transição entre elas (KOLAREVIC, 2003, p. 21). A forma criada por essa união foi considerada como

[104] Ver item 3.2.1.1.2 sobre Técnicas de Modelagem Avançadas.

um gabarito (*master model*), no qual o processo de criação da estrutura, e a consequente construção, se basearam (FRANKEN, 2003, p. 128).

Figura 101 – Sequência de imagem demonstrando a modelagem por *metaball*

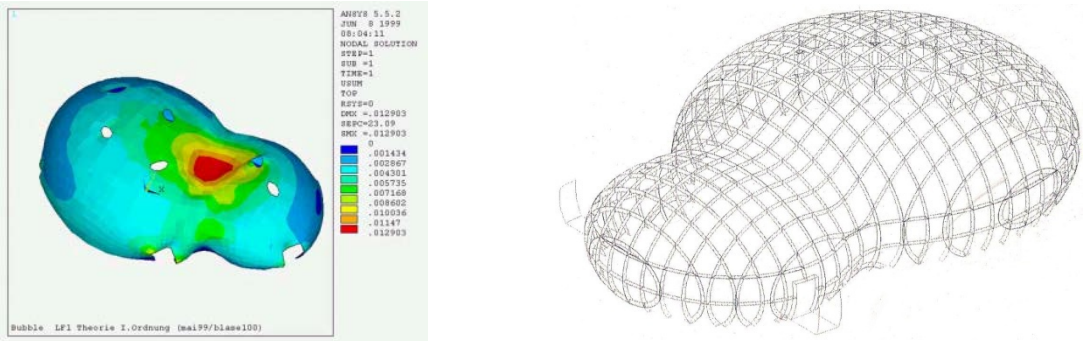


Fonte: SCHODEK, 2005, p. 71.

Sobre esse modelo, os engenheiros estruturalistas realizaram análises pelo método de elementos finitos[105] (Figura 102a) através dos programas Ansys e R-stab, para prever o comportamento estrutural do pavilhão (SCHODEK, 2005, p. 71).

Figura 102 – Bubble BMW Pavilion: (a) análise pelo método de elementos finitos; (b) modelo geométrico da estrutura em grelha

(a) (b)



Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 24 e 43.

O sistema resultante dessa análise foi uma estrutura de alumínio em grelha (um sistema criado pelo processo de *contouring*[106], ver Figura 102b) com fechamento externo em painéis de acrílico curvo. Esses painéis não possuíam formato padronizado devido a curvatura da edificação, o que resultou em 305 painéis diferentes. Eles foram construídos com técnicas de fabricação digital[107] (Figura 103), usando fresas para esculpir a espuma, que serviam de moldes para dar a curvatura do edifício aos painéis planos mediante aquecimento do acrílico (FRANKEN, 2003, p. 133).

[105] Comentado no item 2.1.5.

[106] No *contouring* (contorno), os sistemas estruturais são obtidos através do corte da forma externa do edifício por uma seqüência de seções planas, geralmente paralelas entre si e posicionadas em intervalos regulares, formando 'fatias' horizontais e/ou verticais, onde cada seção transversal define o contorno da superfície original. Conceitualmente, é um processo semelhante ao *lofting*, usado na construção de barcos (KOLAREVIC, 2005, p. 43).

[107] Ver item 2.1.5.

Figura 103 – Bubble BMW Pavilion: sequência de fabricação dos painéis de acrílico curvo

Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 35.

Tanto o projeto e a construção do edifício, concluídos em 1999, foram considerados inovadores e amplamente publicados, como no livro *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, do arquiteto Branko Kolarevic.

4.2.6 Sala de conferências do Banco DZ

A sala de conferências do banco Deutsche Zentral-Genossenschaftsbank (*DZ Bank*) está localizada no átrio de um edifício de uso misto no centro de Berlin na Alemanha. Sua localização se faz em terreno retangular no lado sul da Pariser Platz, que está no final do eixo viário Unter den Linden. Foi projetado pelo arquiteto Frank O. Gehry, em 1995, quando ganhou o concurso realizado pelo banco. Houve muitas restrições a forma do projeto por parte do plano diretor da cidade, visto que sua implantação é vizinha a edifícios históricos. Por isso, o arquiteto manteve, para esse projeto, um vocabulário formal que se assemelha ao dos edifícios históricos, mas somente na forma externa, que resultou na aplicação de linhas retas tanto na forma das fachadas do edifício, quanto nas aberturas (SLESSOR, 2002, p. 50). Por outro lado, internamente, o arquiteto pode fazer uso do seu próprio vocabulário formal, o qual se baseia em formas curvas do seu estilo contemporâneo.

Figura 104 – Sala de conferências do Banco DZ: (a) vista aérea; (b) vista interior, mostrando a sala de conferência

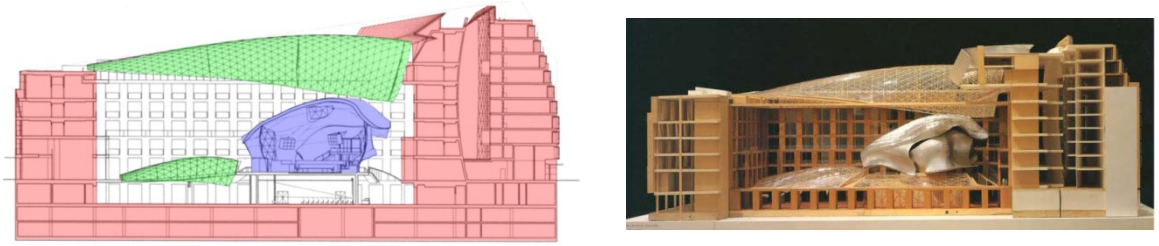
(a) (b)

Fonte: (a) RAGHEB, 2001, p.212; (b) DZ BANK…, 2003, p. 119.

Em maiores detalhes, a proposta formal é composta de três elementos: o bloco retilíneo, duas coberturas e a sala de conferência. O primeiro (já comentado anteriormente), possui duas fachadas em empena e duas com aberturas (em vermelho na Figura 105a), opostas entre si. Uma dessas fachadas com aberturas é plana e a outra é uma sequência de degraus invertidos. O segundo elemento (em verde na Figura 105a) é composto por duas coberturas: uma interna e outra externa, ambas em treliça de aço e vidro, que começam planas e vão encurvando à medida que seguem no sentido da sala de conferência. A interna cobre a cafeteria e a externa cobre o átrio.

Figura 105 – Sala de conferências do Banco DZ - corte longitudinal: (a) esquemático; (b) em maquete

(a) (b)



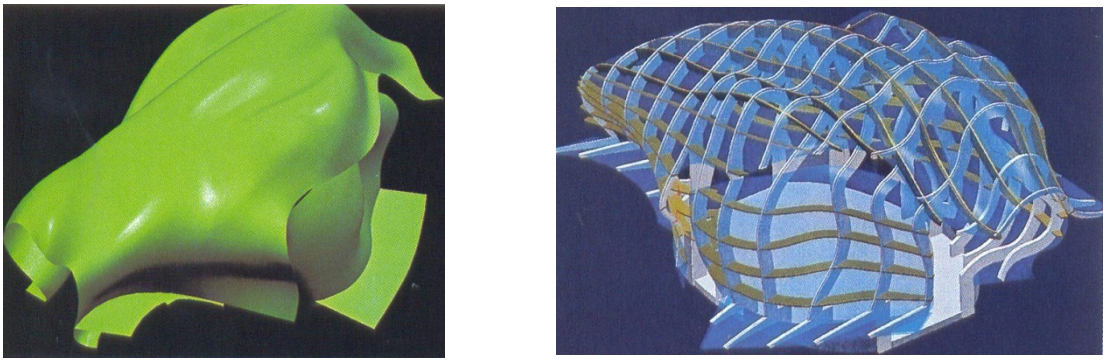
Fonte: DZ BANK…, 2003, p. 120 e 126.

O terceiro é o elemento visual mais marcante (em azul na Figura 105a) e constituído por uma estrutura de quatro andares de altura com forma curvilínea, revestida em aço inox no exterior e madeira no interior. Da mesma maneira que em outros projetos desse arquiteto, o seu vocabulário de formas curvas não pode ser identificado como uma forma clássica ou um caso especial da Geometria e por isso dificulta a descrição do volume da sala de conferência.

Em uma visão geral, a proposta formal da sala de conferência pode ser descrita como um volume curvilíneo mais estreito à frente e amplo na parte posterior, considerando-se a direção longitudinal. Tanto à frente como no sentido oposto, há aberturas com fechamento em vidro na parte mais baixa desse volume, que por outro lado possui uma pequena abertura em sua parte superior. Essas proporções são baseadas em uma cabeça de cavalo, na qual o arquiteto se inspirou e seria utilizada em outro projeto de uma residência (LINDSEY, 2001, p. 57).

Figura 106 – Sala de conferências do Banco DZ - modelo geométrico no CATIA: (a) superfície externa (b) estrutura

(a) (b)



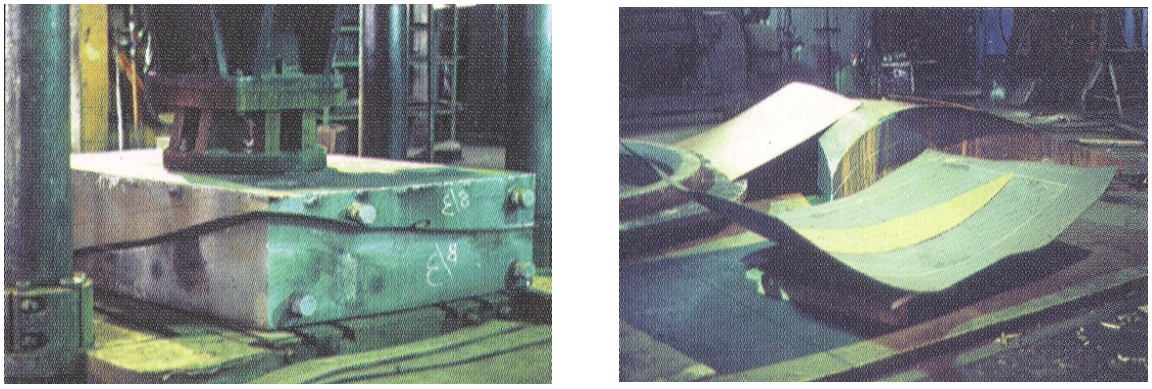
Fonte: RAGHEB, 2001, p. 356.

Esse volume foi a primeira proposta de Frank Gehry que foi gerada diretamente utilizando-se a modelagem geométrica, sem modelos físicos anteriores como era a praxe do escritório. Após a modelagem geométrica, houve a produção de diversos modelos físicos utilizando-se de prototipagem rápida[108] (LINDSEY, 2001, p. 57).

Além disso, a construção finalizada em 2000, não só utilizou as técnicas de fabricação digital comumente aplicadas aos projetos anteriores do escritório, mas também empregou, pela primeira vez, equipamentos CNC de prensagem hidráulica para curvar as chapas metálicas (Figura 107) para o revestimento externo (LINDSEY, 2001, p. 85). Uma técnica raramente utilizada pelo escritório apesar desse frequentemente trabalhar com formas curvas (SHELDEN, 2002, p. 107).

Figura 107 – Sala de conferências do Banco DZ - prensagem hidráulica: (a) chapa sendo prensada no molde; (b) chapa conformada

(a) (b)



Fonte: LINDSEY, 2001, p. 85.

[108] Criação de modelos de pequena escala (protótipos) mediante tecnologias correlatas (comumente, por sistemas aditivos) que fabricam esse modelo diretamente de um arquivo digital (PUPO, 2009, p. 48-50).

4.2.7 Quadracci Pavilion

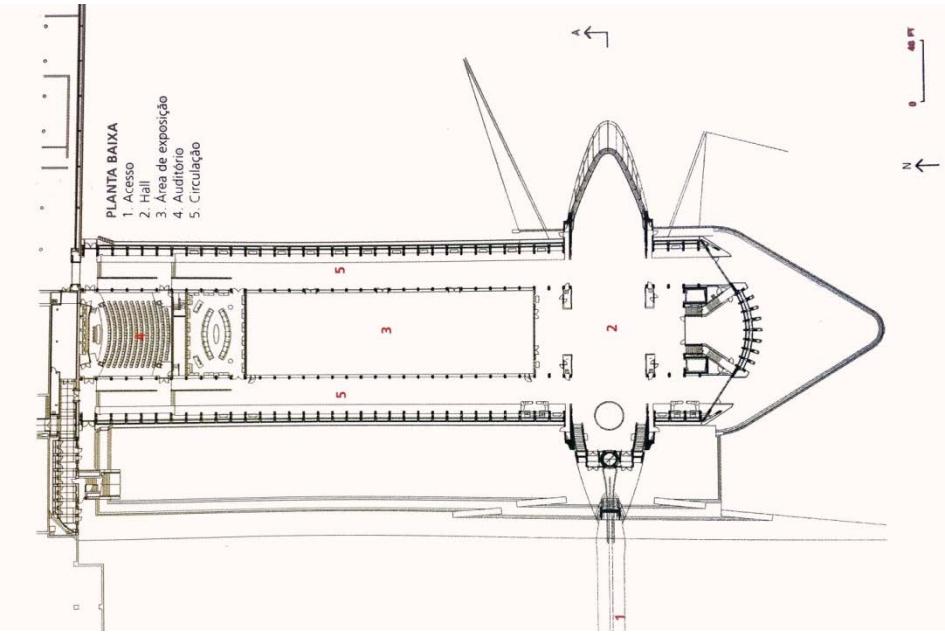
O Pavilhão Quadracci é uma expansão do Museu de Arte de Milwaukee, que está localizado à beira do lago Michigan nos Estados Unidos. A obra serve não só como uma nova entrada do museu, mas também como área de exposições temporárias. Foi projetado, em 1994, pelo arquiteto Santiago Calatrava, que propôs uma forma singular para esse edifício, motivo pelo qual se tornou logomarca do museu e um dos principais ícones da cidade de Milwaukee (SOUSA, 2002, p. 64).

Figura 108 – Quadracci Pavilion: vista área, mostrando a volumetria da edificação

Fonte: SOUSA, 2002, p. 63.

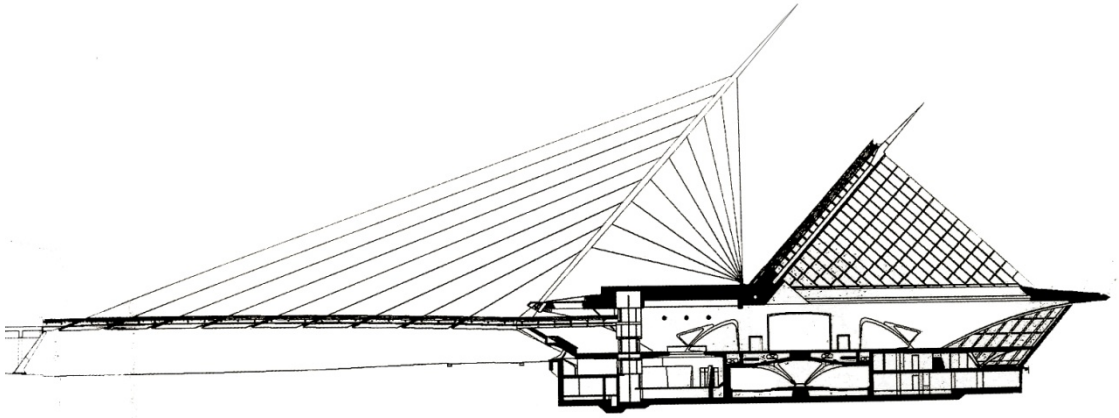
O Quadracci é composto por três elementos principais: o Windhover Hall, a Ponte Reiman e o Burke Brise Soleil. O primeiro compreende o átrio em formato oval e abriga a área de exposições, com o teto de vidro em formato piramidal, 27 metros de altura, que transmite a imponência de uma catedral. O segundo é a passarela de pedestres suspensa por tirantes que liga a entrada a uma das avenidas mais importantes da cidade. O último é o elemento visual mais marcante do pavilhão e possui um formato de seção de um parabolóide hiperbólico, o qual apresenta proporções similares às asas de um pássaro. Elas são compostas por braços móveis em tubos retangulares de aço com uma envergadura de 66 metros que funcionam como brise-soleil, que ao se moverem controlam a incidência de luz e de calor no Windhover Hall, localizado logo abaixo (SOUSA, 2002, p. 62).

Figura 109 – Quadracci Pavilion: planta baixa



Fonte: SOUSA, 2002, p. 63.

Figura 110 – Quadracci Pavilion: corte longitudinal



Fonte: SOUSA, 2002, p. 65.

O edifício, que terminou de ser construído em 2001, é essencialmente de concreto armado, fora o brise-soleil e o teto piramidal, que são de aço e foram fabricados sob encomenda pela *Columbia Wire and Iron Works*, de Portland (THE PHAIDON..., 2004, p. 721).

4.2.8 Eden Project

O Projeto Éden é um complexo turístico que se localiza na cidade St. Austell em Cornwall, no sul da Inglaterra e está implantado no terreno de uma mina de argila desativa, com seus principais edifícios na encosta da colina escavada. Essa estrutura foi criada com o objetivo de informar aos visitantes sobre a importância de um meio ambiente sustentável por meio das

relações entre plantas, pessoas e recursos naturais. Atualmente, o Éden não é só uma atração turística, mas também um jardim botânico que desenvolve pesquisa e educação nessa área.

O Projeto Éden foi projetado pelo escritório de arquitetura Grimshaw Architects à partir de 1996, e o projeto deveria prever um conjunto de estufas de grande escala que acomodassem três tipos diferentes de biomas: um úmido dos trópicos, um quente temperado e um temperado moderado. Para tanto, esse escritório tomou como ponto de partida as treliças em arcos usadas no terminal de Waterloo em Londres, de sua autoria, de modo a criar grandes vão livres sobre a área (Figura 111a), mas devido ao grande peso dessa estrutura, desaconselhada para solos argilosos, esse escritório teve que procurar outra alternativa (KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, p. 247).

Figura 111 – Eden Project, proposta baseada: (a) no terminal de Waterloo; (b) em cúpulas geodésicas

(a) (b)

Fonte: KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, p. 247.

A solução foi encontrada na aplicação de cúpula geodésica estudada e patenteada por Richard Buckminster Füller, pois proporcionavam estruturas leves. Em maiores detalhes, a cúpula geodésica é um sistema estrutural que parte da disposição de arcos sobre uma esfera seguindo a direção e sentido das curvas geodésicas[109], mas que em fins práticos usam-se elementos rígidos retos (REBELLO, 2000, 138). Assim, ela é uma treliça espacial esférica, na qual, comumente, os pontos nodais pertencem à superfície esférica.

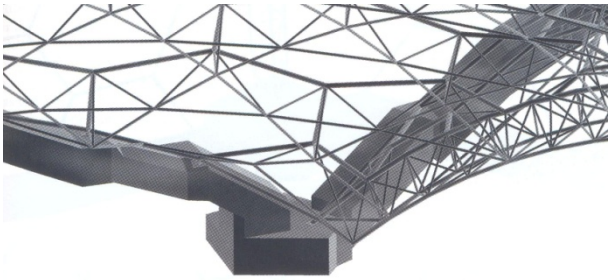
No caso específico do Projeto Éden, a treliça usada foi denominada de "*Tri-Hex-Net*" (Figura 112), uma vez que é composta por duas camadas. A exterior é formada por um padrão geométrico hexagonal, *Hex-net* (em inglês), que é sustentada pela camada interior da estrutura formada por pirâmides triangulares em cada vértice do hexágono, *Tri-net*, que combinadas

[109] Dado dois pontos sobre uma superfície, a geodésica é definida como o caminho mais curto na superfície ligando-os. Isto é análogo ao fato de que a geometria do plano pode ser totalmente caracterizado pelo desenho de linhas retas e da medição de distâncias lineares (HILBERT; COHN-VOSSEN, 1990, p. 220).

formam a "*Tri-Hex-Net*" (ROOF&FACADE ASIA, 2004, p. 3). A escolha do padrão hexagonal ocorreu devido a essa forma permitir uma maior entrada de luz natural do que a treliça da proposta anterior.

Figura 112 – Eden Project: "*Tri-Hex-Net*" (a) perspectiva; (b) vista

(a) (b)



Fonte: SZALAPAJ, 2005, p. 177.

Para tornar essa treliça ainda mais leve, decidiu-se por fechar os módulos hexagonais com membranas infladas em politetrafluoretileno (ETFE) transparente ao invés do vidro, conforme Figura 113.

Figura 113 – Eden Project, painel de ETFE: (a) fotografia em detalhe; (b) vista aérea

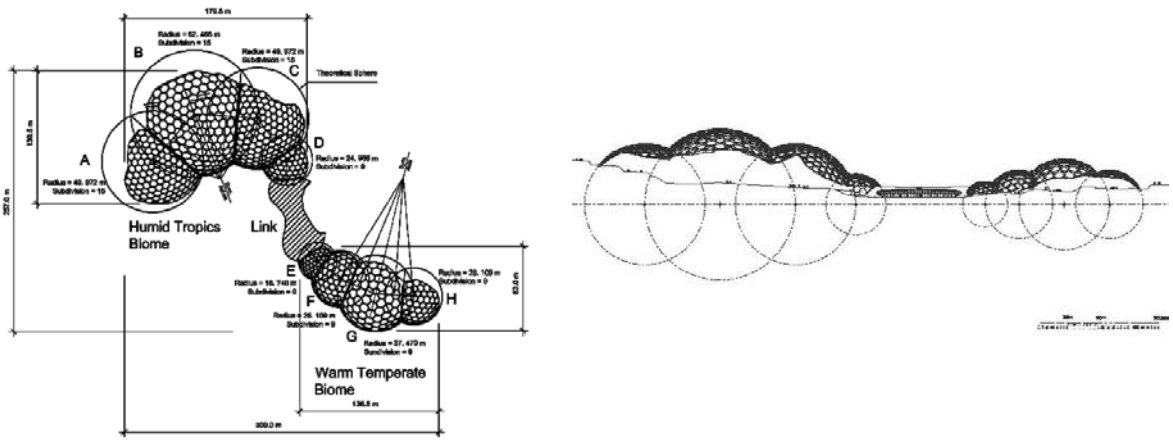
(a) (b)

Fonte: (a) KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, p. 254; (b) ROOF&FACADE ASIA, 2004, p. 3.

Partindo dessa solução estrutural, foi formulada a proposta formal que é composta de duas grandes estufas, ambas com quatro zonas esféricas de diferentes diâmetros, os quais decrescem de valor do centro para ponta, conforme visto na Figura 114. Observa-se ainda que as superfícies esféricas estão unidas e dispostas segundo uma linha sinuosa.

Figura 114 – Desenho mostrando as esferas referenciais das cúpulas: (a) planta; (b) vista

(a) (b)



Fonte: (a) KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, p. 247; (b) BAKER, 2001, p. D4.1.

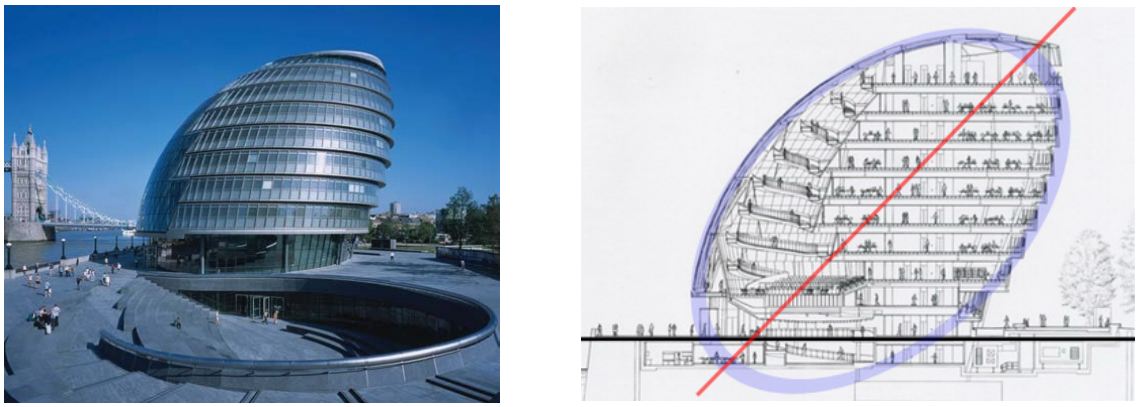
A construção do Projeto Éden foi realizada pela empresa MERO GmbH que fez uso de equipamentos de CNC para pré-fabricar as peças estruturais e foram posteriormente montadas no local, completando a construção das cúpulas em 2001.

4.2.9 Prefeitura de Londres

A sede da Prefeitura de Londres na Inglaterra está localizada no bairro Southwark e em terreno às margens do rio Tâmisa. O edifício faz parte do programa de estímulo ao crescimento econômico dessa zona adjacente ao rio, e se tornou um dos símbolos da capital. Isso se deve a forma não usual escolhida pelo escritório de arquitetura *Fosters and Partners*, que projetou, em 1998, o *London City Hall*.

Figura 115 – (a) vista lateral do London City Hall; (b) esquema ilustrativo da inclinação do edifício

(a) (b)



Fonte: (a) KOLAREVIC; MALKAWI, 2005, p. 211; (b) HYATT; HYATT, 2006, p. 65.

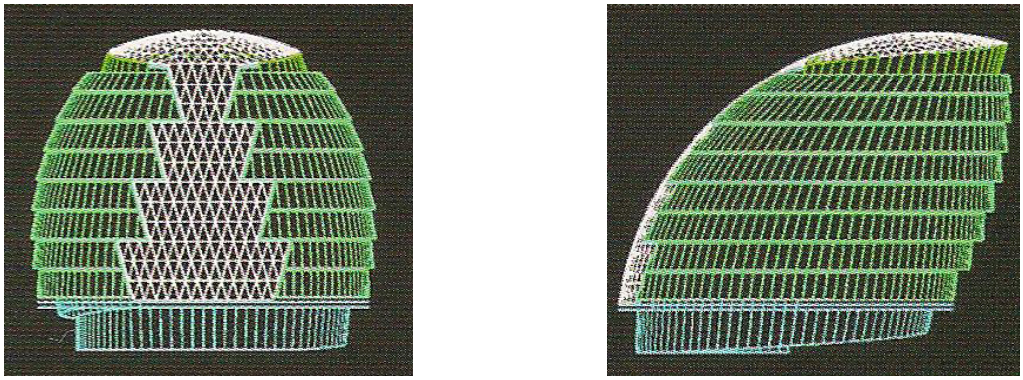
De uma forma geral, a forma externa da Prefeitura, vista na Figura 115b, pode ser descrita como um elipsóide inclinado (em azul), do qual o maior eixo (em vermelho) forma um ângulo obtuso com o nível do terreno em sentido à margem do rio Tâmisa (ABEL, 2004, p. 144).

Conforme Whitehead (2003, p. 85), essa forma do elipsóide foi gerada a partir da deformação de uma esfera, a qual era a idéia inicial a ser empregada no edifício por oferecer mínima área de superfície para o máximo de volume, chegando a 25% menos que um paralelepípedo de mesmo volume. Ao usar a esfera, buscou-se minimizar a área de superfície do edifício exposta diretamente à luz solar.

Criar um revestimento de fachada a partir dessa forma externa foi um desafio, solucionado ao seccionar horizontalmente esse elipsóide e transformar a superfície curva, entre essas seções, em tronco de cones. O resultado, segundo Whitehead (2003, p. 87), foi um conjunto de tronco de cones dispostos uns sobre os outros (Figura 116a), que a cada nível se deslocada em direção da inclinação inicial do elipsóide e cria uma sequência de degraus invertidos na fachada do edifício (Figura 116b). Com essa solução foi possível fabricar o revestimento através de painéis planos.

Figura 116 – Modelo geométrico: (a) vista da fachada norte com a cortina de vidro; (b) vista lateral do edifício, mostrando a curvatura da cortina, à esquerda e os degraus invertidos, à direita

(a) (b)



Fonte: WHITEHEAD, 2003, p. 87.

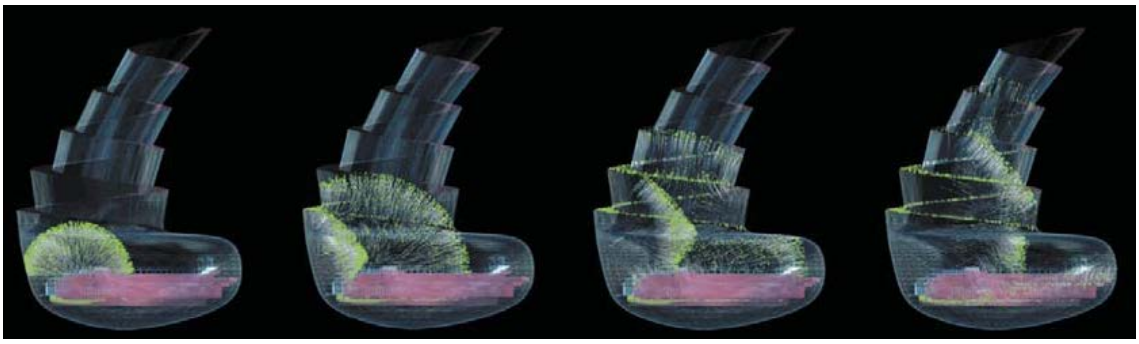
No lado oposto aos degraus invertidos, se encontra a fachada norte que possui a sua faixa central com pouca incidência solar. Essa característica permitiu que os arquitetos utilizassem uma cortina de vidro nesse local (em branco na Figura 116a), sem ocasionar aumento dos níveis térmicos no interior imediato à cortina. Essa cortina é formada por trapézios com altura equivalente a duas alturas dos troncos de cones e, cuja largura decresce tanto a cada altura do trapézio, quanto do pavimento inferior ao superior. Além disso, ela é dividida em painéis triangulares e planos, que se encaixam de tal maneira que permitem a reprodução da curvatura inicial do elipsóide (Figura 116b) e criam a concordância entre os troncos de cones.

No interior dessa cortina está localizado um átrio contendo a assembléia, que por sua vez é coberta por uma rampa helicoidal, ao longo da qual se encontram todas as repartições da prefeitura separadas em andares. O primeiro pavimento possui a planta em elipse e à medida

que os pavimentos vão subindo, o eixo maior da elipse é encurtando até que estas se tornem círculos (WHITEHEAD, 2003, p. 86). Assim, cada pavimento possui uma característica própria.

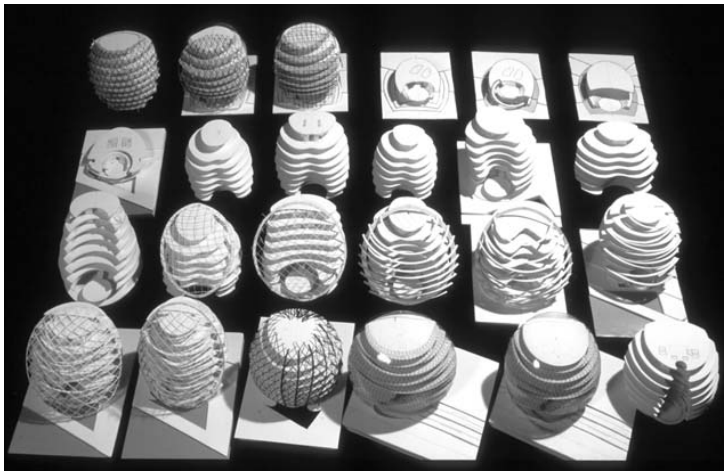
Todo o processo de projeto foi auxiliado por computador, desde a análise de conforto ambiental, como por exemplo, a análise de incidência solar no edifício, ou na análise acústica para a assembléia (Figura 117). Ou ainda, na modelagem paramétrica do elipsóide, usando o Microstation da Bentley, e na fabricação de maquetes para estudos das alternativas de projeto, através da prototipagem rápida[110] (Figura 118).

Figura 117 – Sequência de imagens da análise acústica da assembléia



Fonte: KOLAREVIC; MALKAWI, 2005, p. 49.

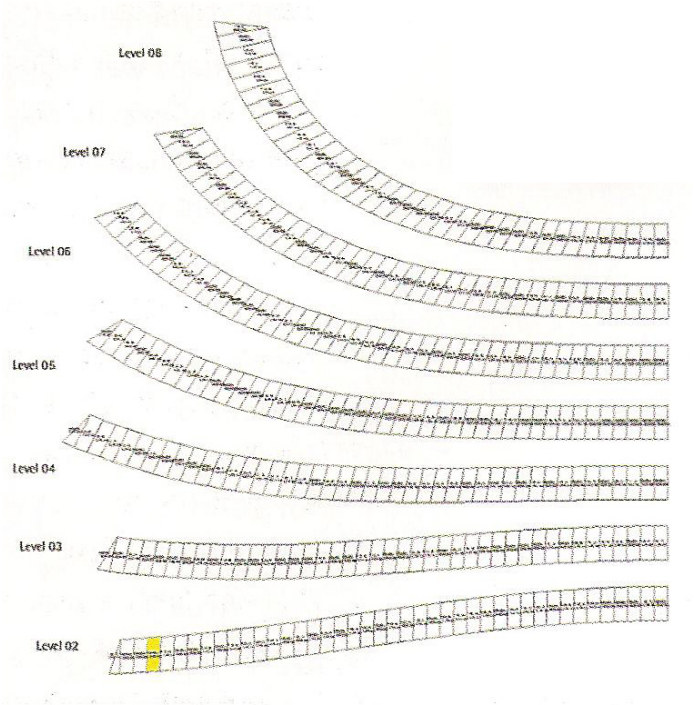
Figura 118 – Estudos volumétricos utilizando a prototipagem rápida



Fonte: ABEL, 2004, p. 145.

[110] Criação de modelos físicos em pequena escala mediante tecnologias correlatas (comumente, por sistemas aditivos) que fabricam esse modelo a partir de um arquivo digital (PUPO, 2009, p. 48-50).

Figura 119 –Desenvolvimento dos troncos de cone e sua identificação



Fonte: WHITEHEAD, 2003, p. 87.

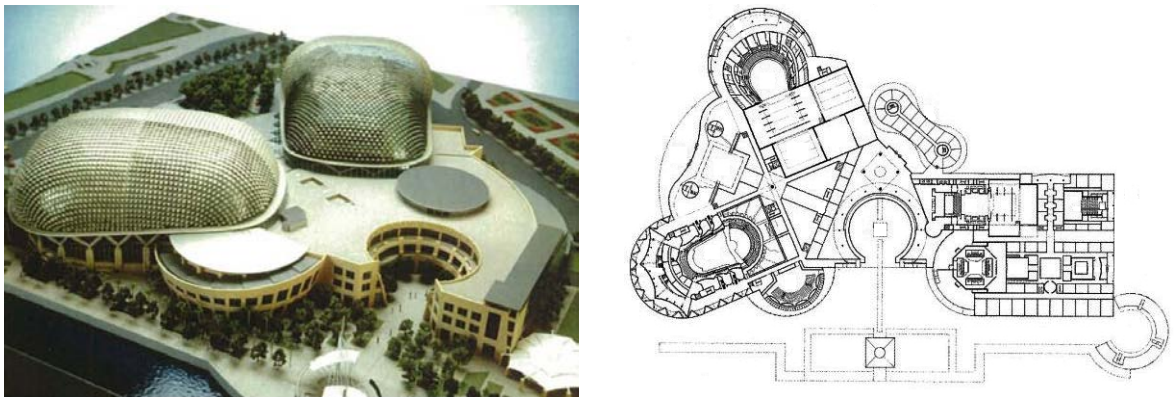
Para a construção, finalizada em 2002, foi usado o suporte de programação do Microstation, empregando-se macros para planificar automaticamente cada painel dos troncos de cone correspondentes aos pavimentos, calculando as áreas e os identificando adequadamente (Figura 119), otimizando assim, a produção da documentação para a construção.

4.2.10 Complexo Esplanade

O Complexo Esplanade, um centro cultural formado por quatro teatros e uma sala de concertos, está localizado no bairro que há uma concentração de diversas instituições culturais da República de Cingapura. Sua implantação se faz em terreno de 4 hectares a beira mar, na Marina Bay. No final de 1993, o escritório DP Architects ganhou o concurso de projetos para esse complexo junto com Michael Wilford & Partners (MWP), ambos desenvolveram o projeto até 1995 quando o MWP desistiu. A edificação possui um formato distinto e inspirado em padrões de formas naturais comumente utilizados na arte do sudeste asiático, sendo frequentemente chamada pelos habitantes locais de *durian* (fruta local).

Figura 120 – Complexo Esplanade: (a) maquete do concurso; (b) planta baixa

(a) (b)



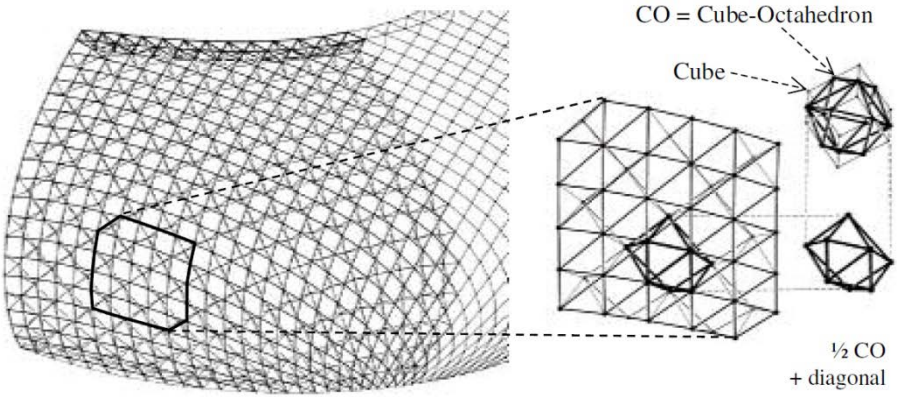
Fonte: (a) SOUTHEAST ASIA BUILDING, p. 26; (b) THE PHAIDON..., 2004, p. 202.

Em maiores detalhes, a sua proposta formal é composta de dois elementos: um bloco e duas coberturas curvas. O primeiro é essencialmente em concreto e apesar de possuir um formato irregular em planta, é composto de retas e de arcos, sendo um volume discreto. O segundo é composto de duas coberturas metálicas que cobrem os teatros principais e devido a composição visual criada pelo formato de dupla curvatura, se tornaram os elementos visuais mais marcantes desse complexo.

Conforme Schodek e colaboradores (2005, p. 77), os estudos volumétricos foram guiados pelas máscaras de sombras fornecidas pelos engenheiros, que devido ao clima tropical da localidade demandavam uma proteção solar eficiente. Eventualmente, a equipe decidiu por uma forma com a parte superior relativamente plana e as laterais suavemente curvas. De acordo com Sanchez-Alvarez (2002, p. 2), essa forma curva foi definida utilizando-se a modelagem de formas livres[111] com superfícies NURBS, através do Microstation da Bentley. Depois, essa superfície NURBS foi reduzida a uma malha simplificada, devido a decisão de construí-la somente por segmentos de retas, ou seja, com uma treliça. Para escolher a melhor opção de treliça foi contrata a empresa alemã Mero-Schmidlin, que ao aplicar seu programa Kondar decidiu pela treliça espacial com camada externa em malha triangular e a camada interior em malha quadrangular na diagonal aos triângulos superiores. O resultado é uma treliça especial cujo módulo prismático é a metade de um Cuboctaedro[112] (Figura 121).

[111] *Free-form deformation*, ver detalhes no item 3.2.2.2 sobre métodos de transformação de superfícies.
[112] É um poliedro semi regular, ou sólido de Arquimedes, que possui como faces seis quadrados e oito triângulos eqüiláteros (AARTS, 2008, p. 301).

Figura 121 – Detalhe da treliça espacial mostrando seu módulo poliedro

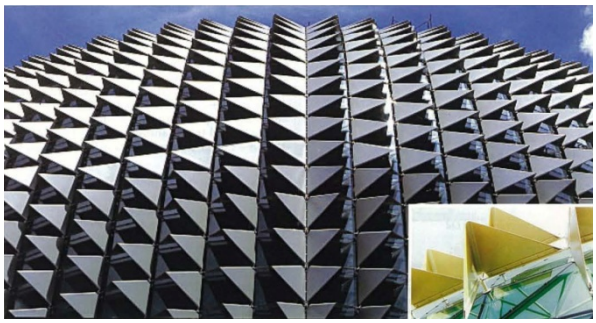


Fonte: SANCHEZ-ALVAREZ, 2002, p. 3.

Como cada um dos teatros estão ordenados diferentemente em relação ao caminho do sol e o projeto das treliças está estreitamente associado à estratégia de proteção solar, cada teatro recebeu uma treliça espacial personalizada com diferentes orientações da sua malha. Além disso, foram geradas duas treliças espaciais para cada superfície curva, cada uma simétrica a outra pelo eixo longitudinal da cobertura (SANCHEZ-ALVAREZ, 2002, p. 2).

A camada externa das treliças recebeu fechamento em painéis triangulares de vidro e proteção solar de alumínio formada por duas superfícies triangulares ligadas uma à outra em um ângulo agudo. Essa superfície cobre de maneira alternada os triângulos de vidros do fechamento da treliça e estão voltadas para fora da treliça com diferentes inclinações guiadas pela orientação solar (Figura 122).

Figura 122 – Detalhe da vista da fachada mostrando a proteção solar



Fonte: ROOF&FACADE ASIA, 2004, p. 1.

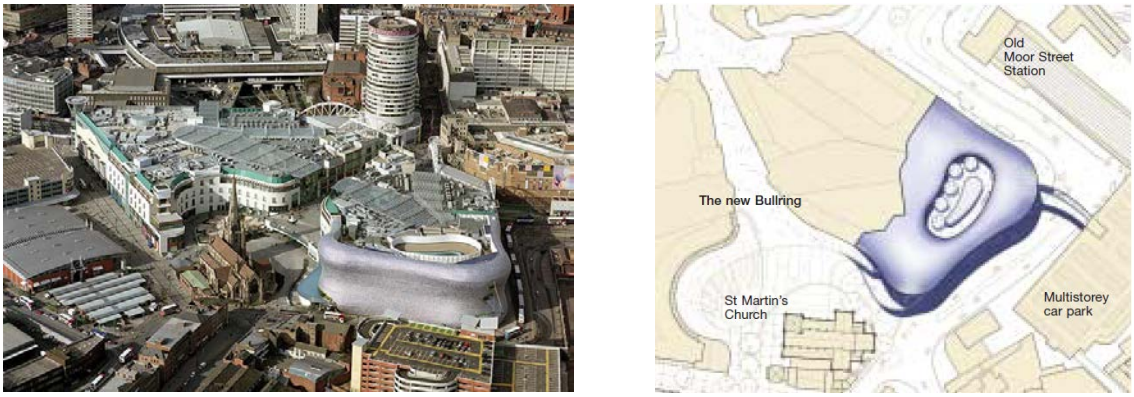
A programa da empresa Mero-Schmidlin, codificou por cores todos os nós e elementos rígidos da treliça, o que ajudou a organizar a produção, transporte, e os procedimentos de montagem no local (SCHODEK et al., 2005, p. 77), sendo a construção da obra finalizada em 2002.

4.2.11 Loja Selfridges de Birmingham

A loja da rede Selfridges é uma das âncoras do *shopping center* do distrito de Bulring em Birmingham na Inglaterra e ocupa quase a metade da área total de um dos dois edifícios que formam o *shopping center* (Figura 123a). Sua localização se faz em terreno de formato irregular e curvilíneo à frente da Igreja de St. Martin (Figura 120b), patrimônio histórico da cidade. Devido a importância econômica desse empreendimento, a rede Selfridges negociou, junto ao conselho diretor Birmingham Alliance, incentivos para se instalar no local. A condição estipulada pela rede de lojas foi a escolha de seu próprio arquiteto para projetar a fachada externa à loja, ao invés de manter o estilo original do *shopping center* (CLARK; GILPIN, 2005, p. 3).

Figura 123 – Loja Selfridges de Birmingham: (a) vista aérea da edificação; (b) planta de situação

(a) (b)



Fonte: (a) HERITAGE EXPLORER, 2012; (b) CLARK; GILPIN, 2005, p. 4.

Em 1999, foi selecionada a proposta do escritório de arquitetura *Future Systems*, que cumpriram a aspiração do cliente em criar uma loja ícone para a sua rede ao se utilizar de uma forma singular para a fachada da loja. Essa fachada é formada por curvas tanto em planta quanto em corte, não possuindo arestas, o que cria uma superfície ondulada compatível com vocabulário formal dos exemplares da blobitecture[113] (JENCKS, 2005, p. 15; CATTERMOLE, 2008, p. 486).

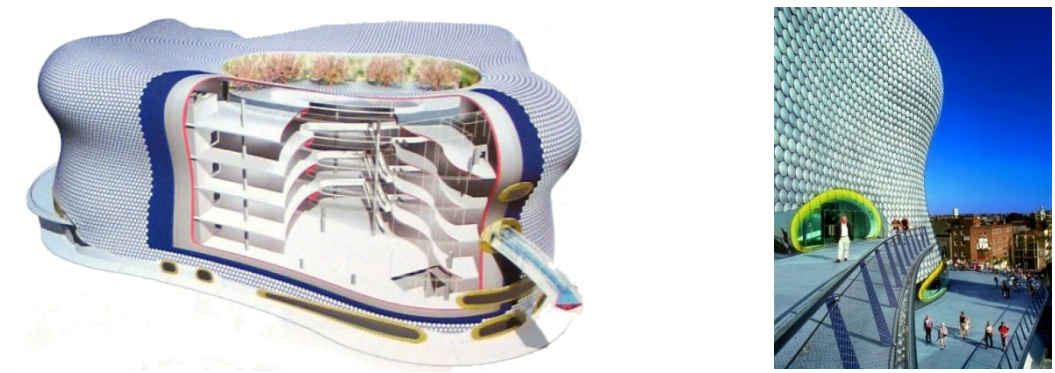
Em maiores detalhes, a proposta formal é composta de três elementos: a passarela (1), as aberturas (2) e a superfície externa (3). O primeiro (1) é uma passarela coberta e curva de trinta e sete metros (Figura 124a), que liga o terceiro andar da loja Selfridges ao edifício de estacionamento vizinho. O segundo (2), é o conjunto de aberturas do edifício dividido em três tipos: janelas (em amarelo na Figura 125), portas (em azul na Figura 125) e o átrio (Figura 124a). Tanto as janelas quanto as portas possuem formato arredondado e receberam um

[113] Ver maiores detalhes no item 2.1.5, sobre o desenvolvimento do CAD na década de 1990.

acabamento cerâmico amarelo na borda de suas aberturas para se destacarem visualmente da fachada (Figura 124b). A maioria das aberturas se concentra na base do edifício (em preto na Figura 125), a não ser três aberturas, uma em cada andar e que estão alinhadas no eixo vertical da porta de entrada da passarela.

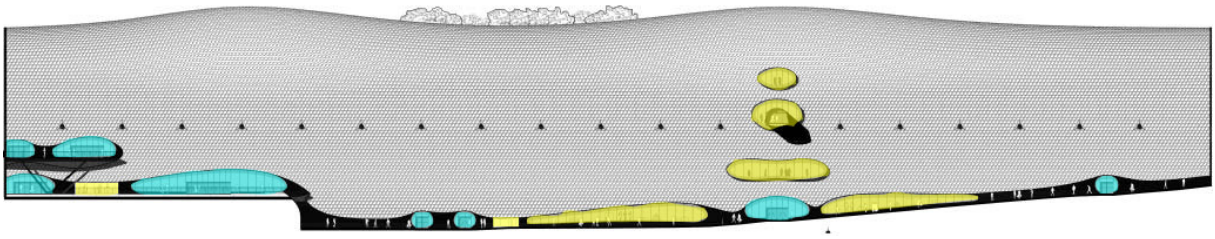
Figura 124 – Loja Selfridges de Birmingham: (a) corte esquemático em perspectiva; (b) vista da lateral do edifício, mostrando as entradas

(a) (b)



Fonte: (a) THE PHAIDON… , 2004, p.275; (b) NICOTRA, 2007, p. 66.

Figura 125 – Loja Selfridges de Birmingham: fachada desenvolvida no plano



Fonte: NICOTRA, 2007, p. 66.

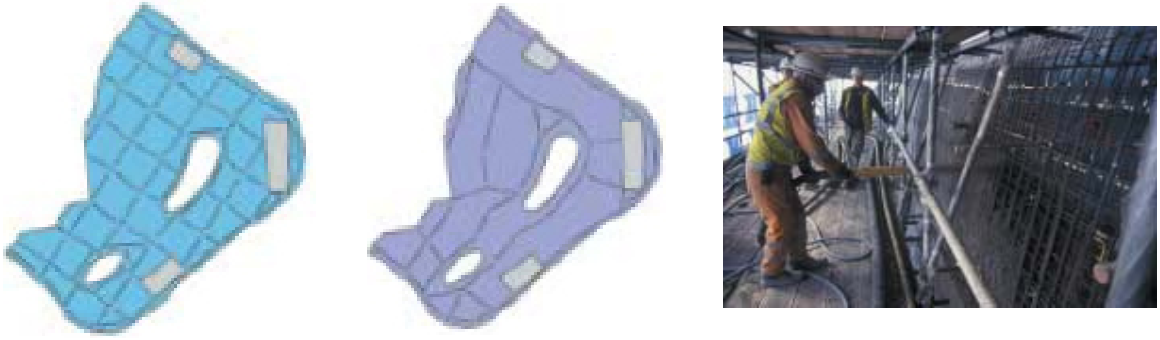
O terceiro elemento (3) é a superfície ondulada descrita anteriormente, que é revestida em monolastex azul e 15 mil discos de alumínio, inspirados em um vestido de cota de malha do estilista Paco Rabanne (CATTERMOLE, 2008, p. 486). A combinação entre superfície externa curvilínea e a textura criada pelos discos formam o elemento visual mais marcante da loja Selfridges.

Desde o início, conforme Clark e Gilpin (2005, p. 3-4), esse projeto foi um desafio de engenharia e de gerenciamento do empreendimento devido à combinação entre a construção em fases do *shopping center*, com formas arquitetônicas curvilíneas e com orçamento exigente. Um dos maiores obstáculos encontrado foi a necessidade de viabilizar a geometria curva da fachada sem incorrer em elevados custos de construção, que foi solucionado com o emprego do sistema estrutural em malha metálica com concreto “projetado” para a fachada (Figura 126c), que permitiu reproduzir as curvas da superfície externa (CLARK; GILPIN, 2005, p. 4).

Outro obstáculo foi escolher um sistema de laje adaptável a curvatura variável da fachada e as grandes alturas entre os pisos. A equipe responsável pelo desenvolvimento desse sistema julgou inadequada a malha estrutural ortogonal (Figura 126a), para esse caso.

Figura 126 – (a) Forma da laje em malha ortogonal; (b) Forma da laje em formato irregular; (c) projeção do concreto sobre a armação da fachada

(a) (b) (c)



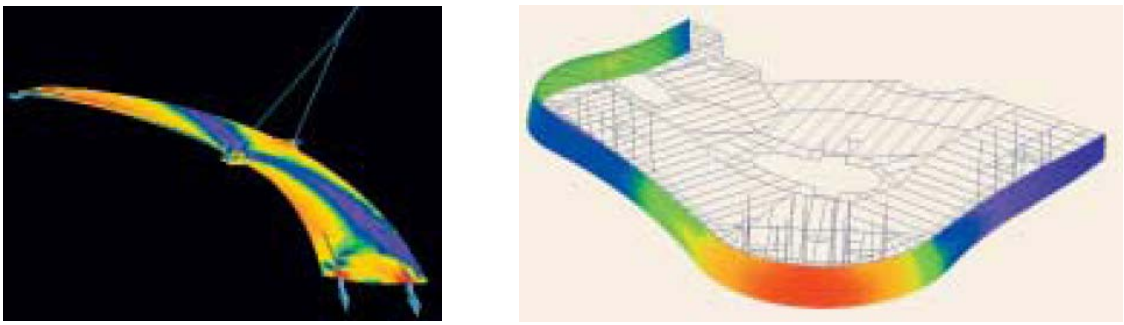
Fonte: CLARK; GILPIN, 2005, p. 4 e 5.

A solução foi encontrada no emprego de lajes metálicas de formato irregular (Figura 126b) produzidas por fabricação digital, que viabilizou economicamente sua aplicação.

Ainda segundo Clark e Gilpin (2005, p. 3-4), para executar os projetos complementares, foi elaborado o modelo geométrico no Rhinoceros, que serviu de referência para os modelos da estrutura. Por exemplo, utilizou-se esse modelo para realizar a análise por elementos finitos do estresse estrutural (Figura 127). Também, empregou-se a tecnologia CAD/CAM em conjunto com a "customização em massa" para fabricar economicamente os diferentes tipos de peças, como os discos de alumínio. Essas tecnologias ajudaram no processo de construção que foi finalizado em 2003, mantendo o cronograma definido pelo *shopping center* e do orçamento estipulado pela loja Selfridges.

Figura 127 – Análise por elementos finitos da estrutura: (a) passarela; (b) fachada

(a) (b)



Fonte: CLARK; GILPIN, 2005, p. 9 e 6.

4.2.12 Museu Kunsthaus de Graz

O museu de arte contemporânea Kunsthaus está localizado no bairro Altstad, onde estão situadas as edificações históricas de Graz, no sudeste da Áustria, onde a implantação se faz em terreno de formato irregular às margens do rio Mur (Figura 128). A edificação foi projetada pelos arquitetos Peter Cook e Colin Fournier, sob o nome de *Spacelab Cook-Fournier*, em cooperação com duas empresas alemãs no ano 2000. A proposta foi elaborada em resposta ao concurso de arquitetura promovido pelo governo local, inserido no programa de estímulo ao crescimento cultural da região, devido a nomeação de Graz como a capital européia da cultura, do ano de 2003 (CATTERMOLE, 2008, p. 484).

A forma externa proposta para o museu por essa equipe possui uma superfície irregular e ondulada, cuja seção transversal diminui à um terço do tamanho ao seguir de um lado para o outro da edificação. Essa forma, sem presença de arestas, pode ser considerada pertencente ao vocabulário formal da Blobitecture (JENCKS, 2005, p. 195).

Figura 128 – Museu Kunsthaus de Graz: (a) vista aérea do entorno da edificação; (b) planta desituação

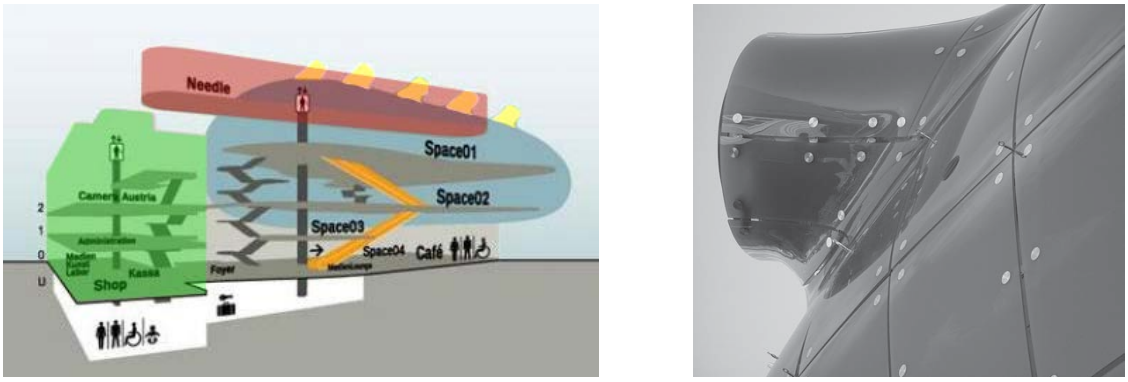
(a) (b)

Fonte: (a) WHITEHEAD, T., 2003, p. D1.1; (b) FISCHER, 2007, p. 395.

Em maiores detalhes, a proposta formal é composta de seis elementos: o Eisernes Haus, a bolha azul, os *nozzles* (bicos), o *pin* (alfinete), o *neddle* (agulha) e o BIX. O primeiro (em verde na Figura 129a) é o primeiro edifício de ferro fundido da Áustria, construído em 1852 e foi restaurado para ser aproveitado como parte do museu, sendo a entrada principal dele (THE PHAIDON... , 2008, p. 490). O segundo (em azul na Figura 129a) é o fechamento externo do edifício, que dá a sua forma singular. Ele é composto por três camadas: treliça metálica (a mais interna), painéis sanduíche metálicos com revestimento isolante (intermediário) e, externamente, por 1.300 painéis retangulares e translúcidos de plástico azul (polimetacrilato de metilo com nome fantasia de plexiglas).

Figura 129 – (a) esquema ilustrativo dos elementos do edifício; (b) detalhe, destacando um *nozzle*

(a) (b)

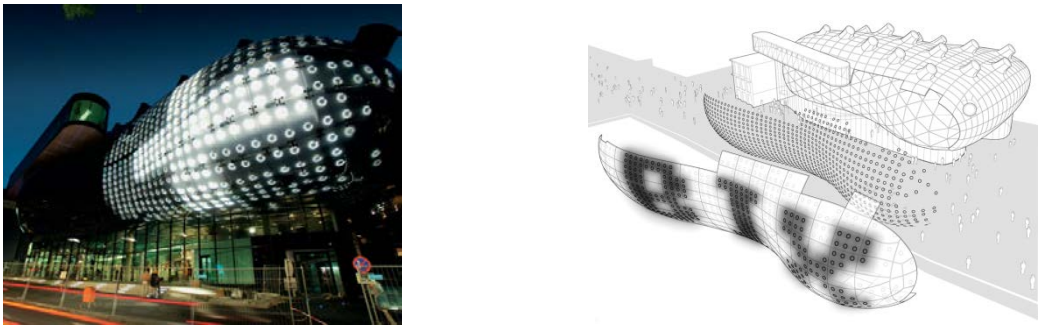


Fonte: (a) SZALAPAJ, 2005, p. 88; (b) EDLER, 2005, p. 153.

O terceiro (em amarelo Figura 129a) são as quinze clarabóias que se projetam para fora do edifício e estão voltadas para norte, de modo a permitir iluminação natural de maneira mais eficiente (THE PHAIDON... , 2008, p. 490). O quarto (em laranja na Figura 129a) é uma esteira rolante de 40 metros, uma das circulações verticais entre os três andares do museu. O quinto (em vermelho na Figura 129a) é a passarela fechada em vidro, sobre a cobertura com vista para o rio, na altura aproximada de 16 metros, além de ser a saída das salas de exposições.

Figura 130 – BIX: (a) fotografia do BIX funcionando; (b) perspectiva explodida

(a) (b)



Fonte: (a) BULLIVANT, 2005, p. 83; (b) EDLER, 2005, p. 154.

O sexto e último (Figura 130), é um sistema de iluminação computadorizada formado por um conjunto de 930 lâmpadas em forma circular e foi chamado de BIX (*big pixel*) (SZALAPAJ, 2005, p. 97). Esse sistema está na fachada da bolha azul que está voltada para o rio e se localiza entre a camada do plexiglas e os painéis sanduíches que formam a camada interna da fachada (Figura 130b). O BIX cria imagens estáticas ou em movimento, de modo que a fachada do edifício se torna num sistema de comunicação ou de expressão artística.

Conforme Kloft (2005, p. 140-141), durante a fase de concepção, essa forma curvilínea da bolha azul foi gerada utilizando-se de processos manuais convencionais, especificamente, por

meio da maquete. Entretanto, para o desenvolvimento do projeto foi necessário o auxílio de ferramentas CAD. A equipe decidiu por construir um modelo geométrico da maquete, de forma independente, ou seja, a forma gerada foi inserida no ambiente de modelagem, a partir da digitalização do modelo físico, que é um procedimento padrão no escritório de Frank Gehry. O modelo geométrico foi gerado por modelagem de formas livres (*free-form deformation*)[114] no programa Rhinoceros da *McNeel* (Figura 131a) e depois exportado para o Microstation, onde o modelo foi desenvolvido e decomposto em elementos construtivos.

Figura 131 – (a) modelagem de formas livres da superfície do museu; (b) análise de elementos finitos; (c) modelo geométrico da estrutura treliçada do museu

(a) (b) (c)

Fonte: KLOFT, 2005, p. 141 e 143.

O uso do computador também orientou a escolha do solução estrutural (Figura 131b e 131c) em três camadas (descrita anteriormente), e da modulação do revestimento em plexiglas. Além disso, para confirmar a viabilidade construtiva do empreendimento, foram desenvolvidos inúmeros protótipos (escala 1:1) de vários dos principais componentes da construção, por exemplo, dos painéis do sistema de iluminação BIX (BULLIVANT, 2005, p. 84). A construção da obra foi finalizada em 2003.

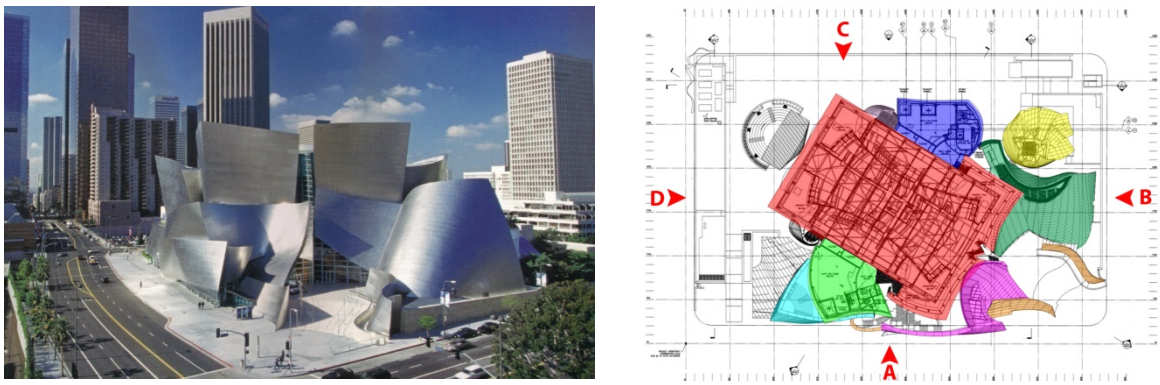
4.2.13 Walt Disney Concert Hall

O Walt Disney Concert Hall (WDCH) é uma edificação que abriga salas de espetáculo localizadas no centro da cidade de Los Angeles nos Estados Unidos da América. Sua implantação se faz em terreno quadrangular, ocupa metade da quadra e por isso possui três laterais livres. Começou a ser projetado pelo arquiteto Frank O. Gehry, em 1988, quando ganhou o concurso de arquitetura para a sede da orquestra filarmônica da cidade, o qual foi primeiramente patrocinado pela família Disney, de modo que o edifício foi batizado em seu nome (CATTERMOLE, 2008, p. 487).

[114] Ver mais detalhes no item 3.2.2.2.1, sobre Transformações Geométricas.

Figura 132 – Walt Disney Concert Hall: (a) vista da fachada; (b) planta baixa do sexto andar

(a) (b)



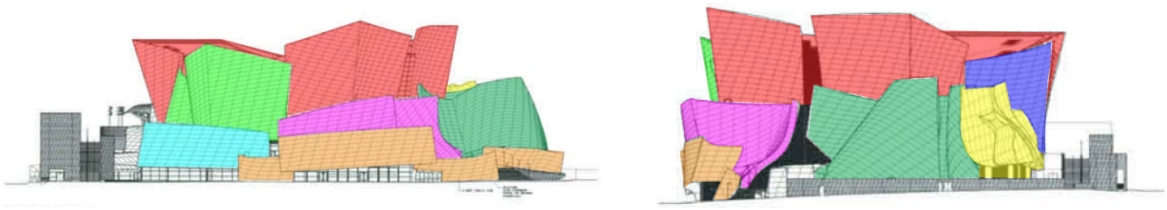
Fonte: (a) BURRY; BURRY, 2010, p. 47; (b) WALT… , 2003, p. 73.

De maneira similar a outros projetos desse arquiteto, o seu vocabulário de formas curvas não pode ser identificado como uma forma clássica ou um caso especial da Geometria e por isso dificulta a descrição do volume do WDCH. Assim, a sua forma complexa será descrita somente em linhas gerais, a seguir.

Em linhas gerais, a proposta formal do WDCH pode ser descrita como um volume central (em vermelho nas Figuras 132b, 133 e 134) cercado na frente e nas laterais por aproximadamente oito volumes de diferentes formatos e tamanhos (nas outras cores nas Figuras 132b, 133 e 134).

Figura 133 – Walt Disney Concert Hall: (a) vista A; (b) vista B

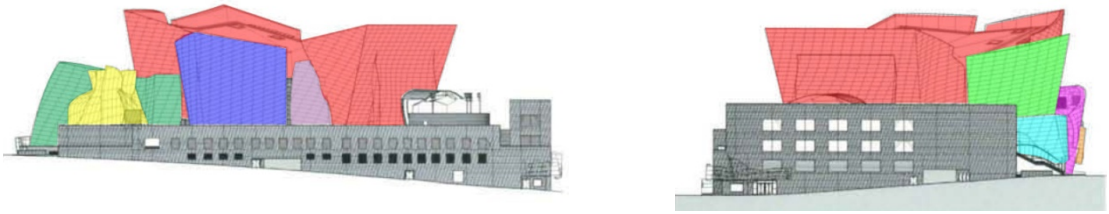
(a) (b)



Fonte: WALT... , 2003, p. 58-59.

Figura 134 – Walt Disney Concert Hall: (a) vista C; (b) vista D

(a) (b)



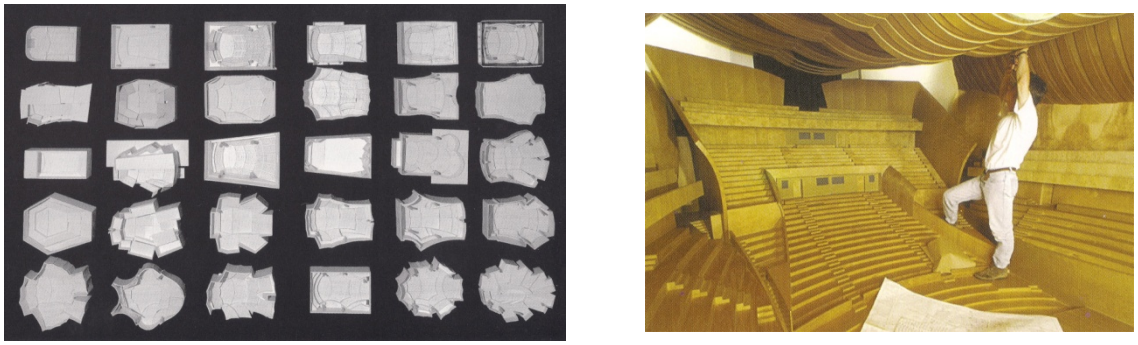
Fonte: WALT... , 2003, p. 58-59.

Esse volume central se aproxima de um prisma trapezoidal invertido e está disposto em diagonal do terreno (Figura 132b). Nele está contida a sala principal, na qual focou-se o

projeto do WDCH e por isso, conforme Glymph (2003, p. 104), foram investidos muitas horas de estudos de opções de formas baseadas em análises acústicas (Figura 135). Assim, a forma da edificação foi desenvolvida de dentro para fora, diferindo do procedimento padrão do escritório de Gehry: "*skin in*" [115].

Figura 135 – Sala principal: (a) estudos em modelos físicos; (b) maquete em grande escala para realizar análise acústica

(a) (b)

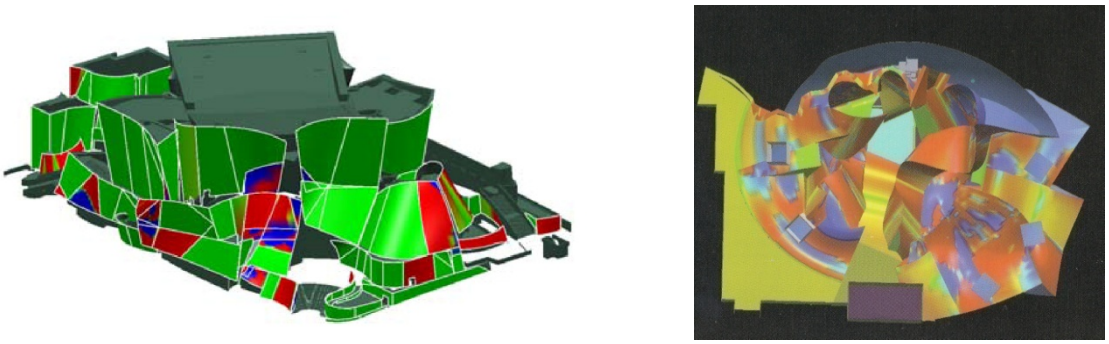


Fonte: GLYMPH, 2003, p. 104 e 107.

O projeto do WDCH foi finalizado[116] quando as regras de construções de superfícies dentro do ambiente de modelagem paramétrica do escritório já haviam sido estabelecidas e estavam mais maduras do que quando usadas para o projeto do Museu Guggenheim de Bilbao. Por isso, houve um maior emprego de superfícies regradas e/ou desenvolvíveis, que pode ser percebido na maior quantidade de superfícies com curvatura gaussiana[117] zero (em verde na Figura 136a) presentes na análise desse tipo de curvatura. Somente um volume menor (em amarelo nas Figuras 132b, 133 e 134), chamado de Founders Room (GLYMPH, 2003, p. 114), que utilizou superfícies com curvaturas em diferentes direções e valores (Figura 136b).

Figura 136 – Análise da curvatura gaussiana das superfícies: (a) das superfícies externas do WDCH; (b) das superfícies internas do Founders Room

(a) (b)

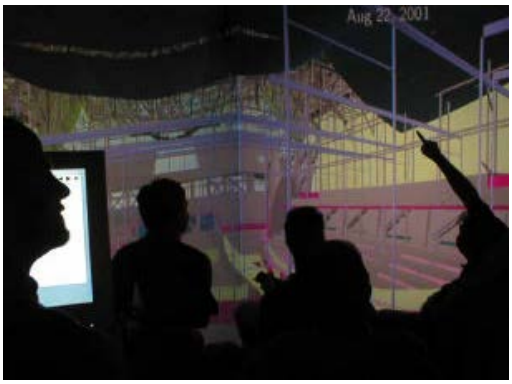


Fonte: (a) SHELDEN, 2002, p. 198; (b) GLYMPH, 2003, p. 114.

[115] Ver item 4.2.3 sobre o Museu Guggenheim de Bilbao.
[116] Devido a vários anos de lento desenvolvimento descrito no final do presente item.
[117] Ver maiores detalhes sobre curvatura gaussiana no item 3.1.2, sobre o Cálculo Infinitesimal e a Geometria Diferencial.

Continuando a desenvolver novos procedimentos de trabalho, o escritório de Gehry, segundo Haymaker e Fischer (2001), adotou a modelagem 4D[118] no planejamento da obra, a fim de avaliar sua aplicabilidade e sua utilidade para projetos complexos como o WDCH, buscando determinar se poderia trazer benefícios a fase construtiva. Outra inovação tecnológica, a Realidade Virtual, foi usada pela primeira vez pelo escritório de Gehry, para criar um ambiente colaborativo para a visualização desses modelos e a consequente discussão entre as equipes multidisciplinares do Walt Disney Concert Hall (Figura 137).

Figura 137 – Colaboração entre diferentes profissionais na Caverna de Realidade Virtual



Fonte: HAYMAKER; FISCHER, 2001, p. 17.

Todas essas inovações, que não estavam disponíveis no final dos anos 80 quando o concurso para o WDCH foi realizado, ajudaram a vencer obstáculos técnicos durante a construção. As dificuldades construtivas combinadas com a baixa arrecadação de verbas para o financiamento da obra, visto que o patrocínio da família Disney foi insuficiente para cobrir os gastos de uma obra tão complexa, fizeram com que os trabalhos seguissem em ritmo lento até sua quase paralisação. Voltaram a crescer, depois da conclusão bem-sucedida do Museu Guggeheim de Bilbao, que demonstrou aos contratantes a viabilidade da obra, fornecendo novos métodos computacionais de projeto, e estimulando o apoio do governo local e de novos financiamentos. Assim, após vários anos de lento desenvolvimento, a edificação recomeçou a ser construída em 1999 e foi concluída em 2003 (GLYMPH, 2003).

4.2.14 Auditório de Tenerife

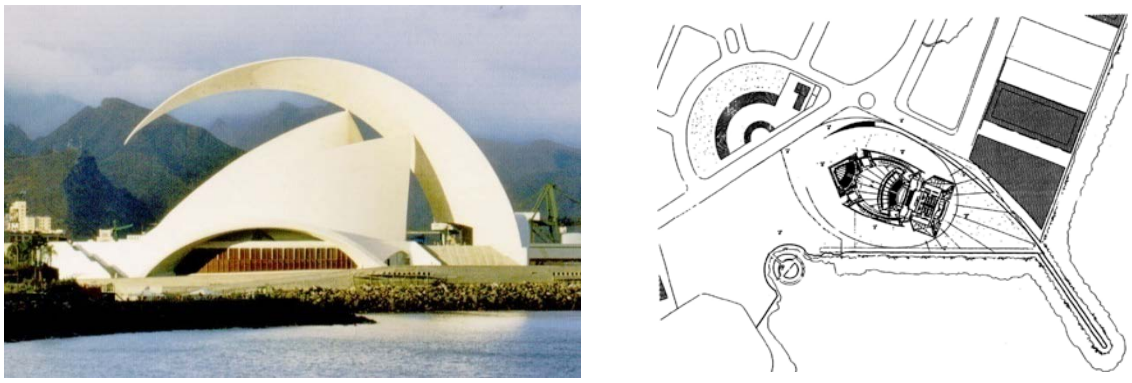
O Auditório de Tenerife é uma edificação que abriga salas de concertos em Santa Cruz de Tenerife, capital das Ilhas Canárias, Espanha. Sua implantação se faz em uma praça elíptica inserida em terreno em forma de polígono irregular, em desnível e à beira mar (Figura 138b).

[118] Modelagem 4D (*4D Modeling*) é a simulação gráfica do processo de construção de uma edificação em ambiente computacional, mostrando a evolução da obra no decorrer do tempo, de modo a prever rotinas da construção e assim antever possíveis problemas (EASTMAN et al., 2011, p. 24).

Foi projetado pelo arquiteto Santiago Calatrava, em 1997, à convite dos governantes da cidade, os quais buscavam uma obra monumental que fosse referência emblemática da ilha (ALONSO; DE ISASI, 1998, p. 41). Por isso, Calatrava propôs um edifício de estrutura de concreto composto de superfícies e volumes curvos, dentre elas a cobertura de forma singular que se assemelha a uma crista de onda.

Figura 138 – Auditório de Tenerife: (a) fachada destacando a volumetria da edificação; (b) planta de situação

(a) (b)



Fonte: (a) JODIDIO, 2005, p. 119; (b) ALONSO; DE ISASI, 1998, p. 42.

Em maiores detalhes, a proposta formal é desenvolvida simetricamente em relação ao eixo longitudinal e pode ser divida em três elementos: embasamento, cúpula e cobertura. O primeiro é a plataforma (em verde na Figura 139) que sustenta os dois outros elementos e contém o pavimento subsolo que recebe iluminação natural em aberturas nas suas laterais. Essas aberturas são cobertas por uma superfície cilindróide que por ser simétrica, sugere um efeito visual de atravessar a plataforma ao se apresentar nas duas laterais da mesma.

O segundo, a cúpula, é o elemento central que cobre a sala principal de concertos (em vermelho na Figura 139) e que por sua vez é composto de dois elementos: um externo e um interno. O externo é definido por duas superfícies resultantes da secção inclinada de uma metade de cone de grande raio. Esse elemento externo circunda o elemento interno à uma certa distância, a qual é ocupada por aberturas de iluminação zenital no nível mais alto da superfície do elemento externo. De maneira diferente, o elemento interno é definido por dois triângulos esféricos[119] que fazem contato em uma curva sobre o eixo de simetria longitudinal.

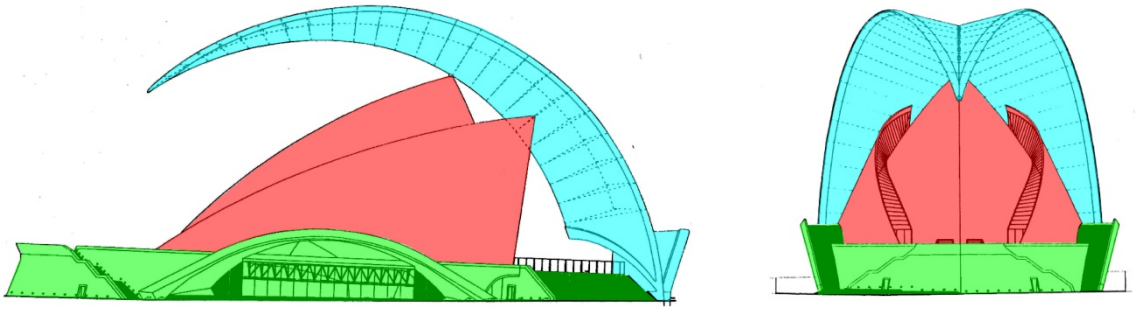
O terceiro elemento, a cobertura, é o elemento visual mais marcante do auditório (em azul na Figura 139), à semelhança de um triângulo esférico que se curva sobre a cúpula, fazendo contato no seu ponto mais alto. Essa superfície triangular tem seu eixo longitudinal sobre o

[119] É a parte da superfície esférica compreendida entre os arcos pertencentes a três circunferências dessa esfera.

eixo de simetria da edificação e se dobra sobre a linha da altura criando uma secção transversal em “V”.

Figura 139 – Auditório de Tenerife: (a) vista lateral; (b) vista da frente

(a) (b)



Fonte: JODIDIO, 2005, p. 118.

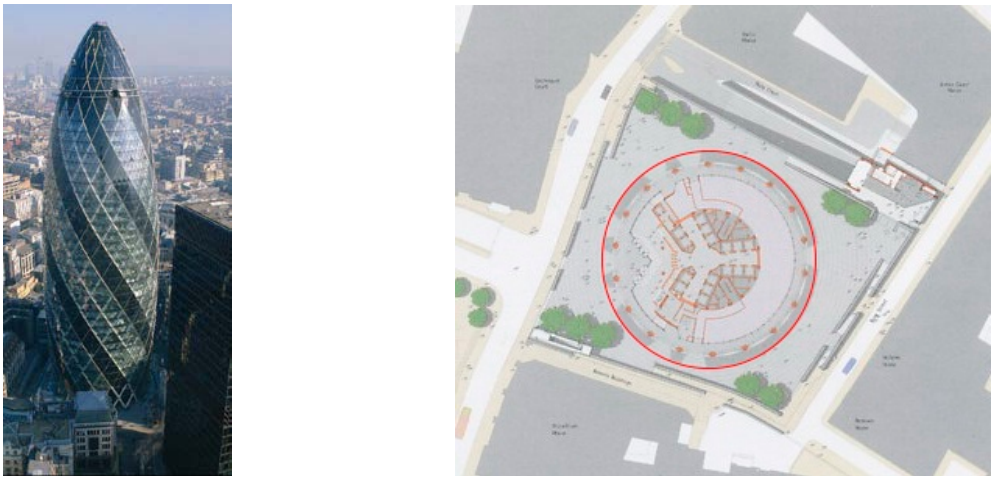
Além disto, a cobertura foi pré-fabricada em Sevilha, enviada em dezessete peças que receberam, além da cobertura de concreto, mosaicos *trencadis* (de cerâmica branca) que são comumente utilizados pelo arquiteto em suas obras. Todo o processo de construção, terminado em 2003, foi executado pela empresa PERI GmbH (EYLON, 2003, p. B.1.2).

4.2.15 30 St. Mary Axe

O edifício de escritórios chamado 30 St. Mary Axe está localizado no centro financeiro de Londres na Inglaterra. Sua implantação (Figura 140b) se faz em terreno quadrangular, ocupa metade da quadra e possuindo três laterais livres. Anteriormente, o prédio pertencia à empresa de seguros Swiss Re que encomendou o projeto, em 1997, ao escritório de arquitetura *Foster and Partners*, e por isso o edifício levava o nome da corporação. Atualmente, seu nome oficial é originário de seu endereço, mas também recebeu da imprensa local o apelido de *gherkin*, que em inglês quer dizer picles (CATTERMOLE, 2008, p. 489). Os arquitetos escolheram uma forma ogival para a superfície externa do edifício, que por ser único entre os edifícios de escritório, se tornou um dos símbolos da cidade.

Figura 140 – 30 St. Mary Axe: (a) fachada destacando a volumetria da edificação; (b) planta de situação

(a) (b)

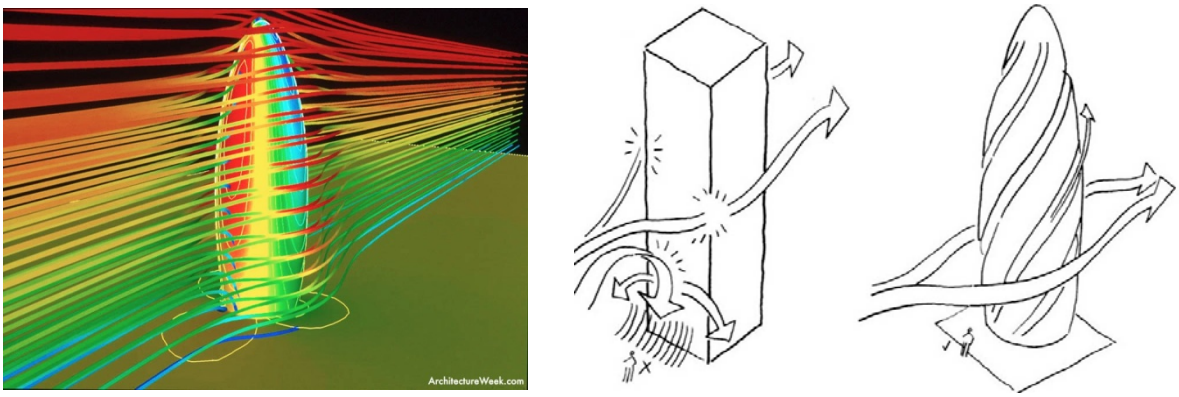


Fonte: (a) JENCKS, 2005, p. 13; (b) HYATT; HYATT, 2006, p. 13.

Essa forma ogival, de 180 m de altura, foi definida não só por suas características aerodinâmicas (Figura 141), de modo a minimizar os esforços causados pela ação dos ventos, mas também por maximizar a entrada de luz natural e da ventilação. Ambas as situações reduzem o consumo de energia do edifício, e demonstram a preocupação com o desempenho energético do edifício. Além disso, essa forma também permite dimensões maiores no diâmetro da planta baixa em andares superiores (ø máximo de 56,15 m), ao tempo em que reduz esse diâmetro ao nível do solo (aproximadamente 49 m), de modo a ocupar menor área, e assim responder às demandas específicas do pequeno terreno no qual a obra foi construída (FOSTER AND PARTNERS, 2005, p. 1).

Figura 141 – (a) Simulação numérica de correntes de vento sobre o edifício; (b) comparação do desempenho aerodinâmico da forma ogival com a prismática

(a) (b)



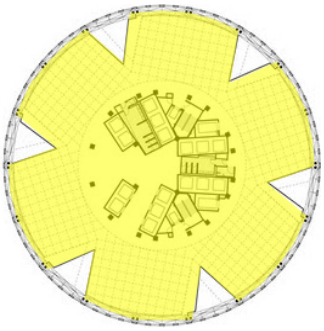
Fonte: FOSTER AND PARTNERS, 2005, p. 1.

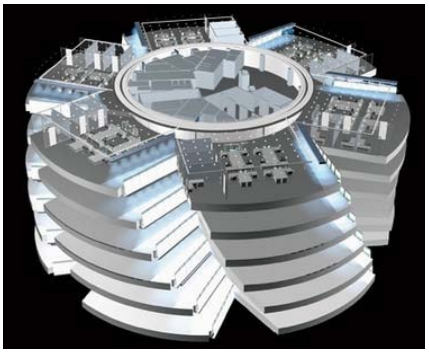
Em maiores detalhes, a proposta formal é composta por três elementos: planta baixa radial, estrutura treliçada e cortina de vidro. O primeiro diz respeito a forma “estrelada” da planta baixa de cada pavimento (em amarelo na Figura 142a), a qual cada um deles possui seis

“pontas”, nas quais são organizadas estações de trabalho. Essas “pontas” se espalham radialmente a partir de um núcleo central em concreto armado, que contém os elevadores e outros serviços. Cada pavimento gira cinco graus em relação ao de baixo (Figura 142b), de modo que os espaços entre as “pontas” criam um átrio, com secção triangular, contínuo do primeiro ao último piso acompanhando o desenvolvimento da treliça da fachada (MUNRO, 2004, p. 41). Esse caminho é marcado na fachada com vidros mais escuros (Figura 140a), devido película de proteção solar.

Figura 142 – (a) planta baixa “estrelada”; (b) modelo geométrico: rotação dos pavimentos para criar átrio contínuo

(a) (b)



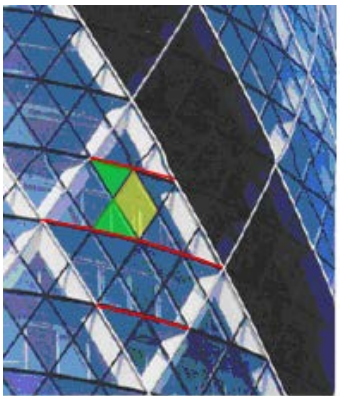


Fonte: (b) FOSTER AND PARTNERS, 2005, p. 2.

O segundo é uma fachada helicoidal treliçada em aço. Conforme Munro (2004, p. 38), houve dificuldade de adaptar a treliça a curvatura da forma ogival projetada. A solução foi projetar alguns elementos da treliça (em branco na Figura 143a) para receberem a carga vertical, ou seja, trabalham como pilares. Desse modo, esses elementos desenham curvas helicoidais na superfície externa do edifício. Devido a curvatura da forma ogival, os elementos horizontais da treliça desenham aros (em preto na Figura 143a) na superfície externa do edifício, que estão localizados no mesmo nível que as lajes.

Figura 143 – (a) Vista interna da treliça; (b) detalhe da padronização da cortina de vidro

(a) (b)

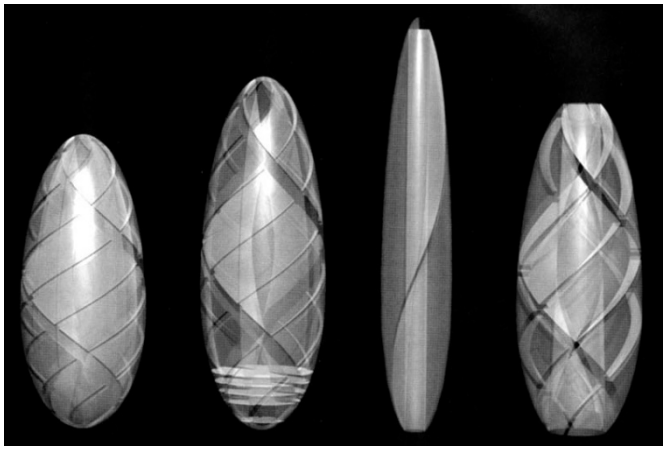


Fonte: (a) FOSTER AND PARTNERS, 2005, p. 2; (b) MUNRO, 2004, p. 43.

O terceiro e último elemento, é a cortina de vidro que faz o fechamento externo do edifício. O padrão de divisão da caxilharia da cortina de vidro acompanha o padrão triangular da treliça e usa como base dois de seus triângulos. O losango formado por eles é divido em quatro partes (em vermelho na Figura 143b) na direção da maior diagonal. Cada uma dessas partes é preenchida pela intercalação entre duas figuras geométricas: o triângulo (em verde) e o losango (em amarelo), vistos na Figura 143 (b).

Tanto as decisões estruturais, quanto as de arquitetura se basearam no uso de técnicas de projeto auxiliadas por computador, no último caso, em modelagem paramétrica usada pelo programa Generative Components da Bentley (OXMAN, 2008, p. 7). Ao empregar essa modelagem, definiu-se a forma básica em relação à alguns parâmetros-chave, o que tornou possível realizar rapidamente inúmeros estudos para a otimização da forma final, pela variação desses parâmetros (Figura 144).

Figura 144 – Diferentes formas, resultado de variação dos parâmetros



Fonte: FOSTER AND PARTNERS, 2005, p. 2.

4.2.16 Centro Musical Sage de Gateshead

O Sage Gateshead é um centro de educação musical, performances e conferências, localizado em Tyneside, a conurbação que inclui Newcastle, Gateshead e cidades adjacentes às margens do rio Tyne (Figura 145a), no nordeste da Inglaterra. Esse empreendimento faz parte do programa do governo local, Quays Gateshead Development, para ampliação de atrações culturais das cidades (COOK; PALMER; SISCHKA, 2006, p. 23) e possui uma gama de patrocinadores particulares, notavelmente o Grupo Sage que contribuiu com valores significativos, de modo que o edifício foi batizado com o nome do grupo. O Sage Gateshead foi concebido em 1997 pelo escritório de arquitetura *Foster and Parterns*, ganhadores do concurso realizado pelo conselho da cidade e que escolheram uma forma externa singular, que

se parecem com a combinação de três *metaballs*[120] (Figura 145b), sendo considerado um dos exemplares da *blobitecture*[121] (JENCKS, 2002, p. 221).

Figura 145 – Centro Musical Sage de Gateshead: (a) vista da edificação às margens do rio Tyne; (b) estudos volumétricos

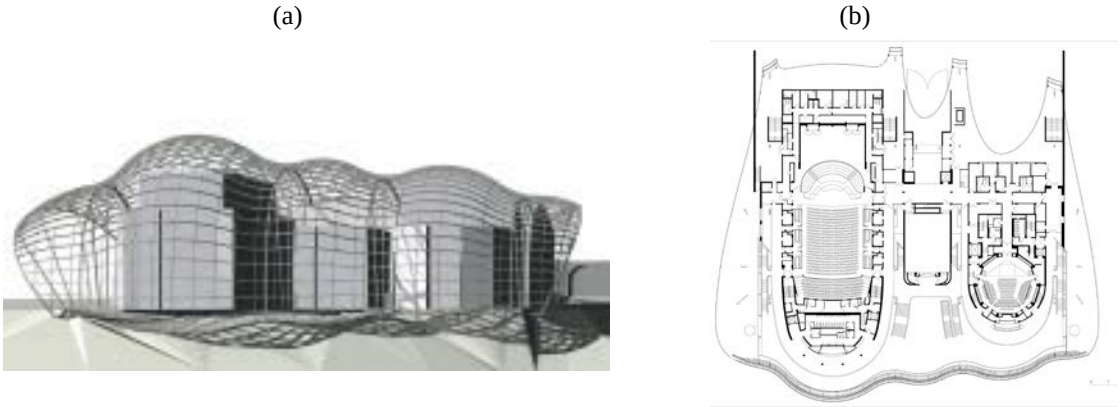
(a) (b)

Fonte: COOK; PALMER; SISCHKA, 2006, p. 23 e 24.

Em maiores detalhes, a proposta formal é composta de dois elementos: um bloco e uma cobertura curva. O primeiro (Figura 146a) é um conjunto de três edifícios em concreto que possuem de quatro a cinco pavimentos e estão construídos em terreno inclinado. Os edifícios desse bloco possuem três tamanhos diferentes, sendo que o menor se encontra entre os dois maiores. O formato desses edifícios é aproximadamente um retângulo com um dos lados menores formado por um arco.

Figura 146 – Centro Musical Sage de Gateshead: (a) modelo geométrico com a cobertura sem revestimento; (b) planta baixa do térreo

(a) (b)



Fonte: (a) COOK; PALMER; SISCHKA, 2006, p. 24 e 23; (b) SARGENT, 2011.

O segundo elemento, a cobertura metálica, que encobre o conjunto de edifícios sem tocá-lo, é o elemento visual mais marcante e define o formato externo da edificação. Conforme Cook, Palmer e Sischka (2006, p. 25), a forma curva criada para essa cobertura, durante os estudos volumétricos, possuía dupla curvatura e teve que receber um método de racionalização da

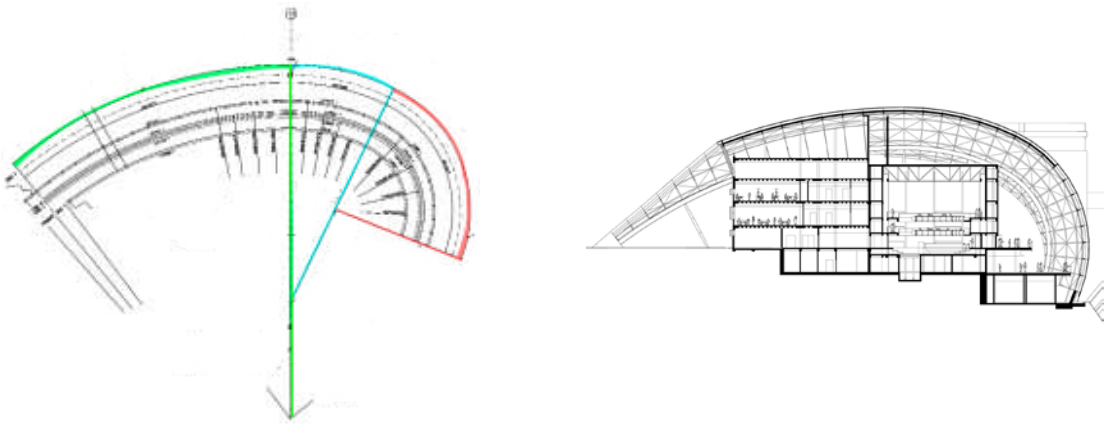
[120] Ver maiores detalhes no item 3.2.2.2.2, sobre Transformações de Combinação.
[121] Ver maiores detalhes no item 2.1.5, sobre o desenvolvimento do CAD na década de 1990.

geometria[122] para viabilizar e otimizar a sua construção. Esse processo determinou regras de comportamento mediante associações geométricas, a principal delas é a preferência por superfícies de curvatura simples formada somente por arcos de circunferência, de modo a existir certa quantidade de repetições dos tipos de elementos construtivos. Essas regras foram usadas para guiar a construção do modelo paramétrico no ambiente do programa Microstation da *Bentley* (GROBMAN; YEZIORO; CAPELUTO, 2009, p. 545) e, assim, explorar diferentes opções de forma para a cobertura.

Ainda de acordo com Cook, Palmer e Sischka (2006, p. 25), o resultado foi uma superfície de varredura[123] tendo como diretriz a curva da secção transversal e como geratriz a curva da secção longitudinal. A primeira foi construída como uma aproximação de curva espiral pela concordância direta[124] de três arcos de circunferência. Na Figura 147a, usou-se cores diferentes para realçar cada arco e seu respectivo raio (linha reta) usados na construção da espiral.

Figura 147 – Centro Musical Sage de Gateshead: (a) curva espiral em três arcos para criar a curva diretriz; (b) resultado no corte transversal

(a) (b)

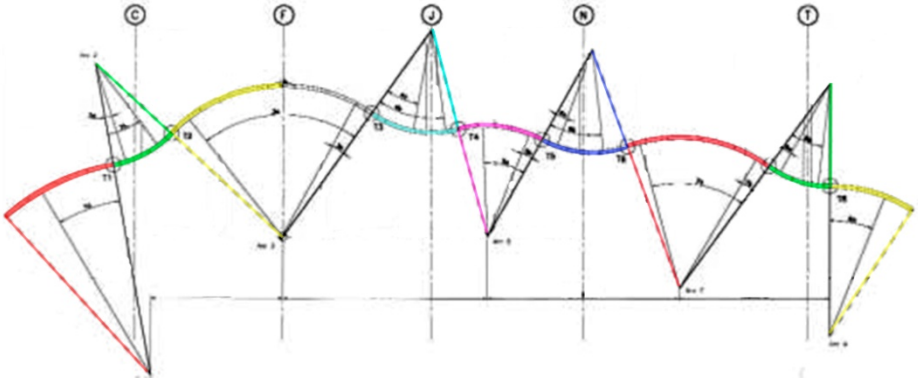


Fonte: (a) COOK; PALMER; SISCHKA, 2006, p. 24 e 23; (b) SARGENT, 2011.

A segunda foi construída pela concordância reversa[125] de nove arcos, criando uma longa curva ondulante, com a condição de sempre cruzar no ponto mais alto da curva espiral. Na Figura 148, usou-se cores diferentes para realçar cada arco e seu respectivo raio (linha reta) usados na construção da curva da secção longitudinal.

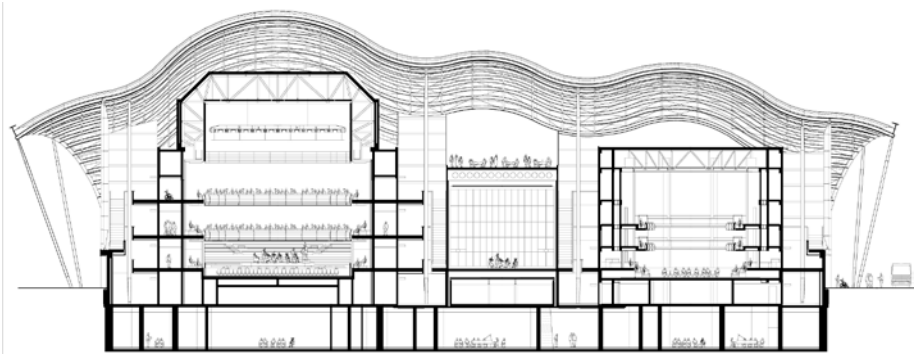
[122] Ver mais detalhes no item 2.1.5, onde se trata sobre fabricação digital.
[123] Ver mais detalhes no item 3.2.2.1.4, sobre superfícies de varredura.
[124] Cada arco encontra um com o outro no mesmo sentido de curvatura.
[125] Cada arco encontra um com o outro em sentido oposto da curvatura.

Figura 148 – Centro Musical Sage de Gateshead: concordância entre 9 arcos para criar a curva geratriz



Fonte: (a) COOK; PALMER; SISCHKA, 2006, p. 24 e 23

Figura 149 – Centro Musical Sage de Gateshead: resultado da concordância no corte longitudinal



Fonte: SARGENT, 2011.

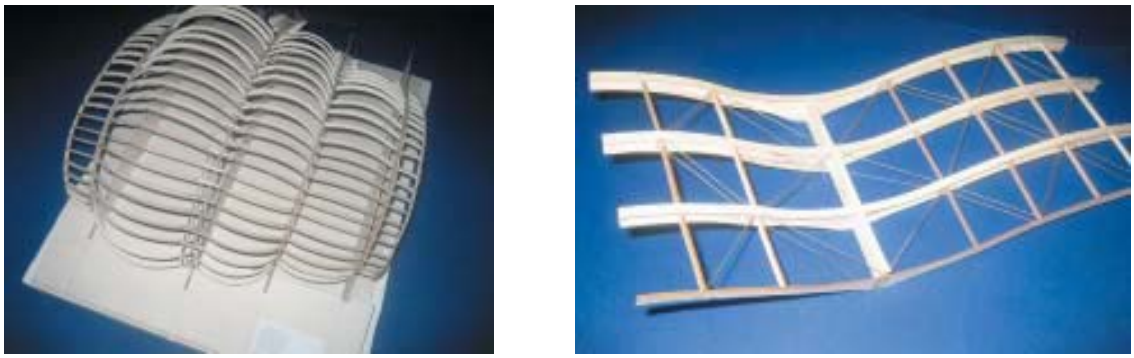
Esse processo conseguiu manter o efeito visual de cobertura composta por três cúpulas originárias dos estudos volumétricos, sendo que cada uma delas é uma superfície sinclástica[126] resultante da secção horizontal (paralela ao furo) de um toro circular (COOK; PALMER; SISCHKA, 2006, p. 23). Por fim, foram executados recortes no formato de parábolas na superfície da cobertura, no lado que possui menor curvatura da secção em espiral, para criar a entrada do Sage Gateshead com acesso aos edifícios encobertos.

O resultado estrutural, segundo Cook, Palmer e Sischka (2006, p. 24), é baseado em uma malha quadrangular que é organizada em uma hierarquia de três níveis. No qual, o primeiro tem-se seis vigas transversais na forma da curva espiral (Figura 150a), no segundo mais de vinte vigas longitudinais na forma da curva geratriz (Figura 150a), divida em seis partes para trabalharem conjuntamente com as vigas principais. Por fim, o terceiro nível tem-se ligações retas (Figura 150b) entre as vigas do segundo nível de modo à controlar a flambagem. Esse sistema estrutural foi utilizado, pois se aproximava do processo tradicional de construção de galpões metálicos, de modo a otimizar a contrução do Sage Gateshead, que mesmo assim levou quatro anos no total e terminou em 2004.

[126] Possui curvatura gaussiana positiva, assim como uma esfera.

Figura 150 – (a) maquete do sistema estrutural, mostrando os dois níveis mais altos; (b) detalhe da estrutura mostrando os elementos do nível três

(a) (b)

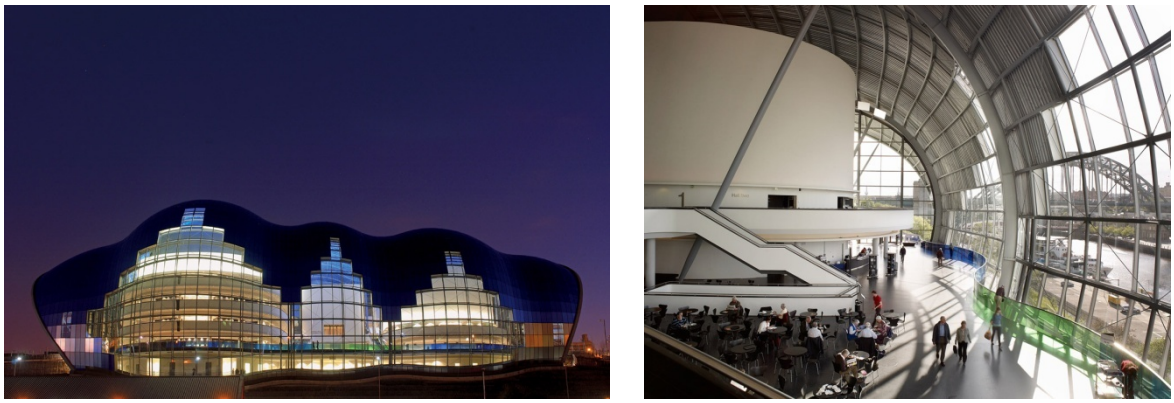


Fonte: COOK; PALMER; SISCHKA, 2006, p. 24.

O fechamento dessa estrutura é feito por painéis quadrangulares de aço inoxidável ao longo da superfície, exceto a frente dos três edifícios, onde o aço inox é substituído por vidro em formato aproximado de três triângulos (um para cada edifício, ver Figura 151a), de modo a dar visão do rio no interior da cobertura (Figura 151b).

Figura 151 – (a) os dois tipos de revestimento da cobertura; (b) visão do rio do interior da edificação

(a) (b)



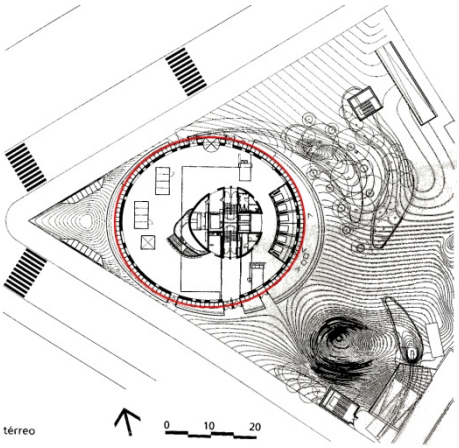
Fonte: SARGENT, 2011.

4.2.17 Torre Agbar

A Torre Agbar é a sede da empresa de saneamento de água, o Grupo Agbar, de Barcelona na Espanha e fez parte do programa da prefeitura local para a criação de um novo distrito comercial em volta da plaça de les Glories Catalanes, região norte da cidade. Sua implantação se faz em terreno triangular (Figura 152a) à frente desta praça e ao longo da Avenida Diagonal (Figura 152b), uma das principais vias da cidade. Foi projetado pelo arquiteto Jean Nouvel em 1999, que teve como inspiração o tema água tendo em vista as atividades dos proprietários do edifício. Esse arquiteto decidiu expressar tal tema, adotando como o formato do edifício uma abstração da forma de um gêiser, que teve como resultado uma forma ogival.

Figura 152 – Torre Agbar: (a) planta de situação; (b) vista aérea do entorno

(a) (b)

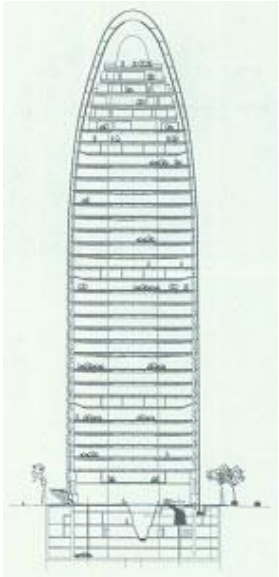


Fonte: (a) ORCIUOLI; MASSAD; YESTE, 2006, p. 56; (b) BENEVOLO, 2007, p. 197.

Em maiores detalhes, de acordo com Cattermole (2008, p. 500), a proposta formal é composta por um cilindróide de secção elíptica que do 14^{0} ao 26^{0} pavimento sofre uma redução do tamanho da secção, curvando para dentro sua superfície (Figura 153). A partir desse pavimento se eleva uma cúpula na forma de um parabolóide elíptico, acompanhando a curvatura do cilindróide, que faz o fechamento do edifício, cobrindo o 31^{0} piso.

Figura 153 – Torre Agbar: (a) volumetria da edificação com iluminação; (b) corte transversal

(a) (b)



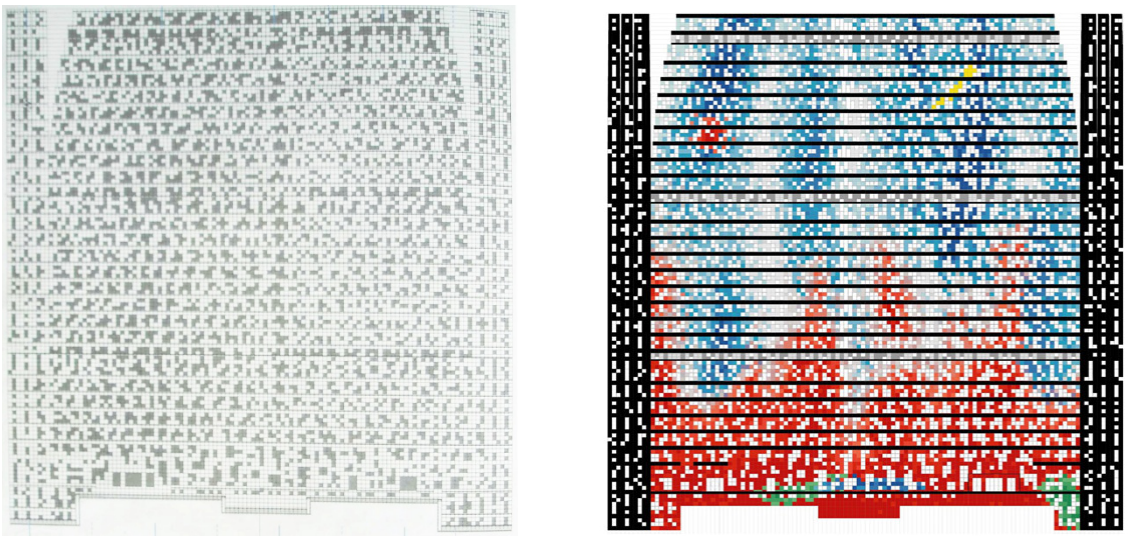
(a) ORCIUOLI; MASSAD; YESTE, 2006, p. 58; (b) THE PHAIDON... , 2008, p. 380.

Essa superfície do cilindróide é trabalhada visualmente pela composição de três elementos: abertura, revestimento e brise. O primeiro é constituído por quatro mil e quatrocentas aberturas quadriculares (em cinza na Figura 154a) de diversos tamanhos e formas criadas com base em uma malha. O segundo é um revestimento de chapas de alumínio onduladas e pintadas em diversas cores (em azul e vermelho na Figura 154b). O terceiro é um sistema de

brises de vidro de diferentes inclinações e opacidade, sustentados por perfis de alumínio. Sendo que esses elementos são distribuídos em padrões diferentes e bastante variados, mas as aberturas foram orientados por critérios de distribuição de entrada de luz natural (ORCIUOLI; MASSAD; YESTE, 2006, p. 58).

Figura 154 – Torre Agbar: (a) distribuição das aberturas desenvolvida em plano; (b) distribuição das cores do revestimento em alumínio

(a) (b)



Fonte: (a) TORRE..., 2002, p. 248; (b) TORRE AGBAR, 2012.

Essa composição com os diferentes tipos de aberturas, tons de cores, ângulos de inclinação e graus de opacidade, pretende evocar a impressão visual da água: uma textura de diferentes níveis de profundidade, luminosidade e cor, criando um efeito visual “fluído” (TORRE..., 2002, p. 238-9). Por outro lado, essa policromia da fachada da torre é considerada uma referência ao trabalho de Gaudí, feita devido a proximidade da Torre Agbar com a igreja da Sagrada Família (BURRY, 2005, p. 31).

Figura 155 – Torre Agbar: protótipo do sistema de brises da fachada

Fonte: TORRE..., 2002, p. 251.

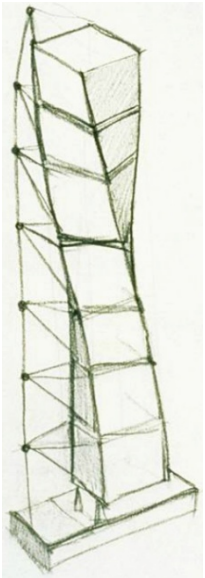
O edifício, que terminou de ser construído em 2005, possui como estrutura dois cilindros autoportantes e não-concêntricos em concreto, o externo é a fachada e o interior contém as escadas, elevadores e instalações especiais. Além disso, a cúpula é composta de estrutura metálica com revestimento de vidro duplo.

4.2.18 HSB Turning Torso

O arranha céu de uso misto chamado HSB Turning Torso está localizado em um antigo bairro industrial do porto ocidental de Malmö, cidade no extremo sul da Suécia. Sua localização se faz em terreno quadrado à três quadras de distância da avenida à beira mar e próxima da Ponte de Öresund, que liga Suécia e Dinamarca. O edifício foi projetado pelo arquiteto Santiago Calatrava, em 1999, à convite da empresa de habitação HSB que participava do programa do governo local de reurbanização com objetivo de ampliar o uso residencial e comercial da área (THE PHAIDON..., 2008, p. 255).

Figura 156 – HSB Turning Torso: (a) estudo da volumetria inicial do edifício; (b) vista da fachada

(a) (b)

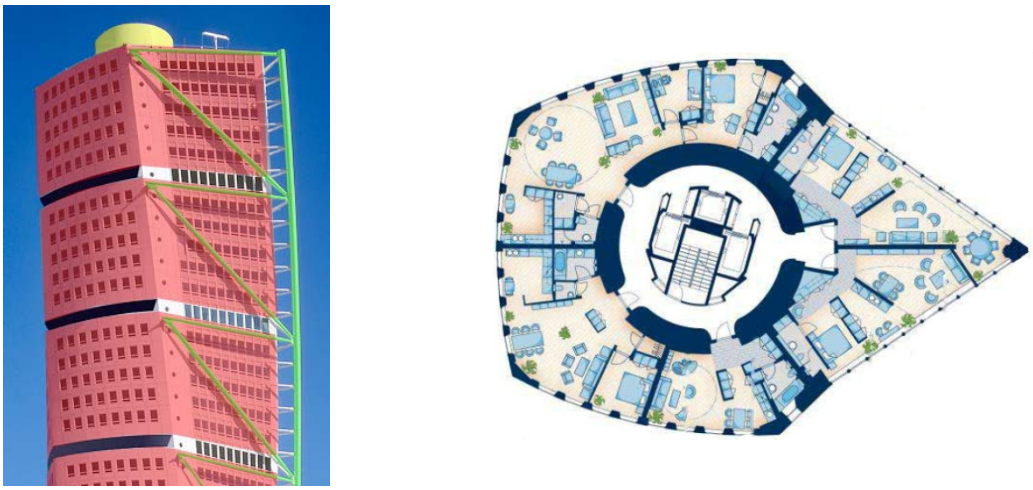


Fonte: (a) SANTIAGO CALATRAVA, 2012; (b) KONE CORPORATION, 2006, p. 9.

A forma do edifício foi baseada em uma escultura do próprio Calatrava, na qual um busto humano gira sobre seu próprio eixo. Essa referência foi abstraída em uma série de cubos (Figura 156a) empilhados um sobre o outro e que gradualmente são rotacionados para completar um giro total de 90º graus da base ao topo. O resultado (Figura 156b) foi a torre de 190 metros de altura e que aparenta ter sofrido uma torção.

Figura 157 – HSB Turning Torso: (a) esquema ilustrativos dos elementos do edifico; (b) planta de pavimento tipo

(a) (b)



Fonte: KONE CORPORATION, 2006, p. 9 e 12.

Em maiores detalhes, a proposta formal é composta por três elementos: os blocos de andares (em vermelho na Figura 157a), o cilindro de concreto (em amarelo na Figura 157a) e a treliça metálica (em verde na Figura 157a). O primeiro é formado por nove blocos cuja planta baixa, vista na Figura 157b, possui o formato poligonal irregular de 5 lados. Cada um desses blocos abriga cinco pavimentos e possuem um espaço entre eles para a manutenção da fachada. Além disso, eles possuem uma série de janelas ordenadas em matriz[127] que compõe a fachada do edifício e que devido ao seu grande número houve necessidade de estudos para encontrar padrões recorrentes, do qual foi definido seis famílias diferentes de janelas, otimizando, assim, a construção (THE CONCRETE CENTRE, 2004, p. 6).

O segundo elemento representa visualmente o eixo de rotação dos blocos de andares mediante um cilindro de concreto que possui função estrutural. Por último, a treliça é composta por um perfil cilíndrico que está posicionado a frente do vértice agudo do polígono irregular da planta baixa (Figura 157b). Essa treliça mantém a distância constante a medida que sobe acompanhando a rotação dos blocos do edifício, ancorando-os através de barras inclinadas.

O edifício que terminou de ser construído em 2005, é essencialmente de concreto armado, com a fachada em painéis curvos de alumínio e a treliça em aço.

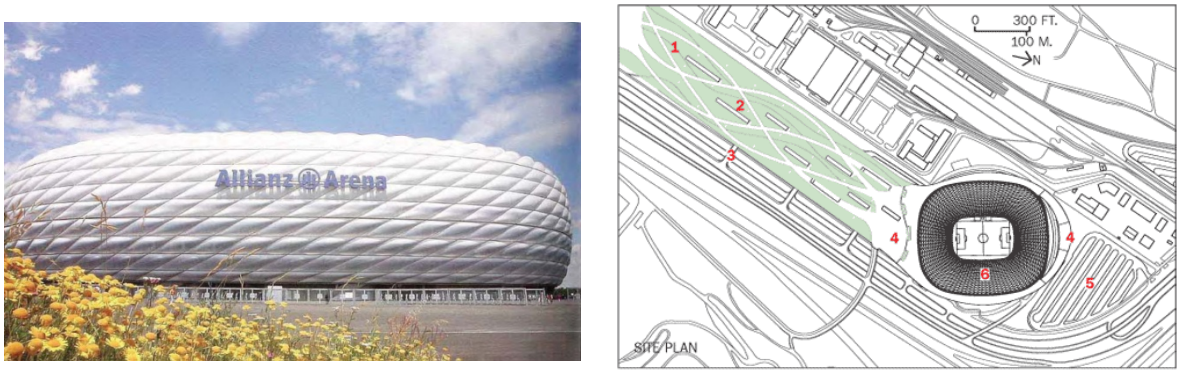
[127] Arranjo de *m.n* elementos matemáticos dispostos num quadro retangular ou quadrado que comporta *m* linhas e *n* colunas.

4.2.19 Estádio Allianz Arena

O estádio de futebol chamado Allianz Arena está localizado no bairro Fröttmaning de Munique no sul da Alemanha. Sua implantação se faz em terreno de formato irregular perto do viaduto de saída dessa cidade (Figura 158b). Foi projetado pelo escritório de arquitetura Herzog & De Meroun em 2001, quando ganharam o concurso de arquitetura promovido pelo governo local com o apoio dos dois times de futebol da cidade que buscavam uma nova sede (CATTERMOLE, 2008, p. 501). A construção do estádio teve uma gama de patrocinadores particulares, notavelmente o Grupo Allianz que contribuiu com valores significativos, de modo que o edifício foi batizado em seu nome.

Figura 158 – Estádio Allianz Arena: (a) vista da fachada; (b) planta de situação

(a) (b)



Fonte: (a) FISCHER, 2007, p. 476; (b) METZ, 2006.

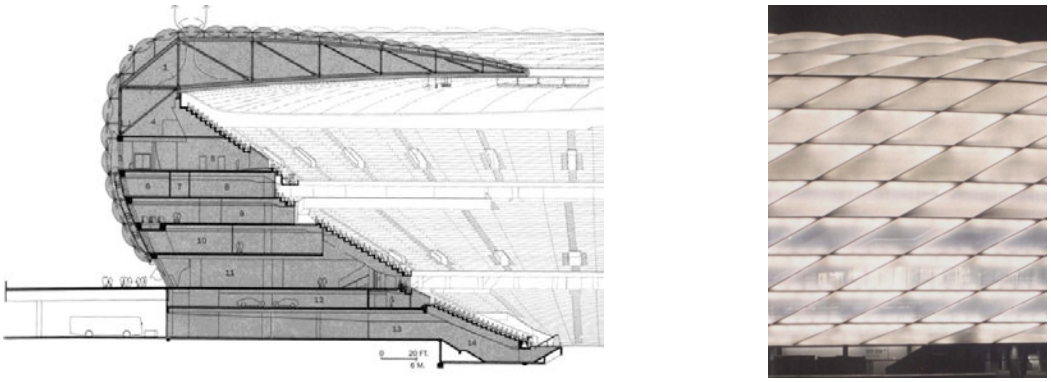
Os arquitetos apresentaram uma proposta de estética incomum a outros estádios, pois propunham um papel icônico para o mesmo, que o tornaria um marco urbano de Munique (LEAL, 2006). Mais ainda, essa decisão marcou o início de uma nova abordagem para projetos de estádios, a qual justificou um maior investimento no aspecto estético das fachadas desses estádios, tendo como exemplo, o Estádio Nacional de Pequim na China e o novo estádio do Valência na Espanha (KHEMLANI, 2009).

Em maiores detalhes, a proposta formal é composta por três elementos: a esplanada, a arquibancada e a cobertura externa. O primeiro (em verde na Figura 158b) é uma grande área aberta (600 m de comprimento e 133 m de largura) com tratamento paisagístico e é o caminho de chegada dos espectadores ao estádio sobre o estacionamento do subsolo (JESKA, 2008, p. 122). O segundo é a estrutura de concreto (Figura 159a) com os assentos, e as áreas comuns e administrativas do estádio, sendo suas proporções orientadas para dar a melhor visão aos espectadores e por isso se tornaram a base na qual se guiaram todas as decisões sobre a forma do estádio (BURROWS et al., 2006, p. 24-25). O terceiro e último, a cobertura externa, é o elemento visual mais marcante e tanto reveste a fachada quanto cobre as arquibancadas.

Visualmente, estabelece um único volume similar a um anel, porém quando visto em planta se assemelha a um retângulo, quase quadrado, de cantos arredondados.

Figura 159 – Estádio Allianz Arena: (a) detalhe do corte; (b) vista aproximada dos painéis de ETFE

(a) (b)

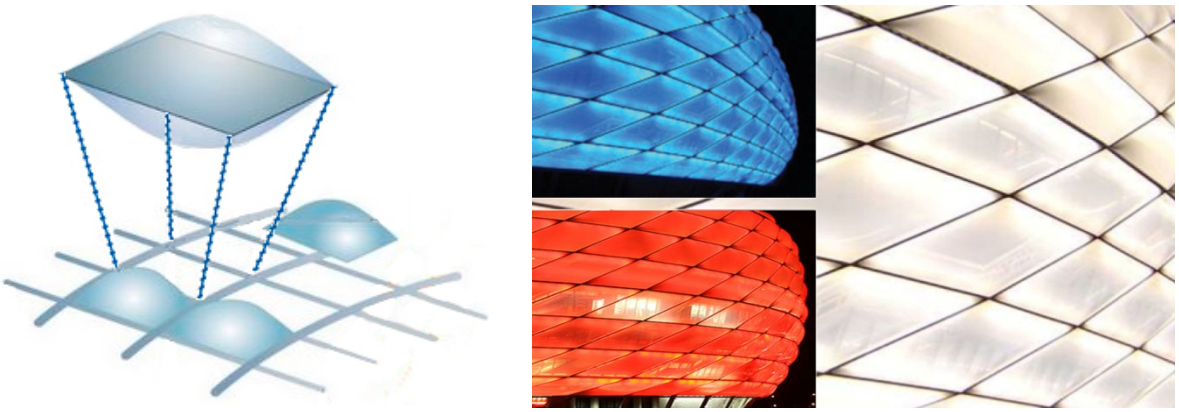


Fonte: JESKA, 2008, p. 127 e 123.

Essa superfície externa é composta por uma estrutura treliçada em aço galvanizado em formato de losango, que quando observado frontalmente possuem a maior diagonal inclinada em relação à horizontal (Figura 159b). Cada losango se torna uma moldura (Figura 160a) para a membrana de politetrafluoretileno (ETFE), que ao ser inflada cria painéis isolantes e configura uma textura para a fachada.

Figura 160 – Estádio Allianz Arena: (a) painéis de ETFE; (b) montagem fotográfica mostrando as cores da iluminação

(a) (b)



Fonte: (a) LAREPUBLICA.PE, 2006.

Além disso, a fachada é equipada com um sistema de iluminação computadorizada formada por um conjunto de quatro mil lâmpadas, que lhe rendeu o apelido de “Anel de Fogo” (METZ, 2006). Essa iluminação faz com que os painéis de ETFE mudem de cor para refletir qual dos dois clubes de futebol está presente: vermelho para o clube Bayern e azul para o clube 1860s (Figura 160b).

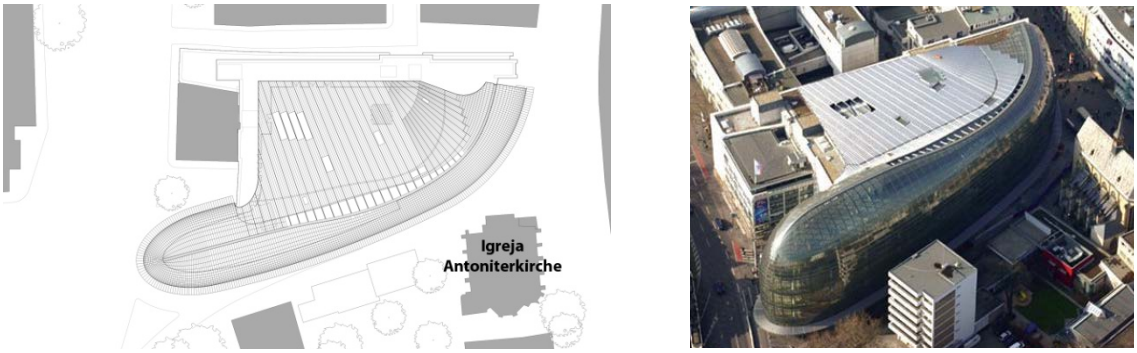
Muitos aspectos da projetação e características do projeto foram desenvolvidos, desde a fase de concepção, em programas de modelagem paramétrica, a saber, o CATIA da Dassault Systemes e o Digital Project da Gehry Technologies. Essas ferramentas foram customizadas com *constraints* especificas à tipologia de um estádio, desenvolvidas pelo grupo ArupSport, uma divisão especializada em edifícios esportivos da empresa de engenharia Arup (BURROWS et al., 2006, p. 27). A ArupSport esteve presente desde a concepção do estádio até a sua construção, finalizada em 2005.

4.2.20 Loja Peek & Cloppenburg de Colônia

A loja de departamentos da rede Peek & Cloppenburg está localizada no centro comercial de Colônia na Alemanha. Sua implantação se faz em terreno que ocupa um quarteirão de formato aproximado a um trapézio à frente da Igreja de Antoniterkirche. Foi projetado pelo escritório Renzo Piano Building Workshop, em 1999, que escolheu um formato que combinou dois elementos diferentes: um bloco de cinco andares em concreto e uma fachada curva em vidro e aço (Figura 161b). O segundo elemento possui uma forma curvilínea distinta do seu contexto urbano e, por isso tornou-se um identificador visual da obra.

Figura 161 – Peek & Cloppenburg: (a) planta de situação; (b) vista aérea

(a) (b)

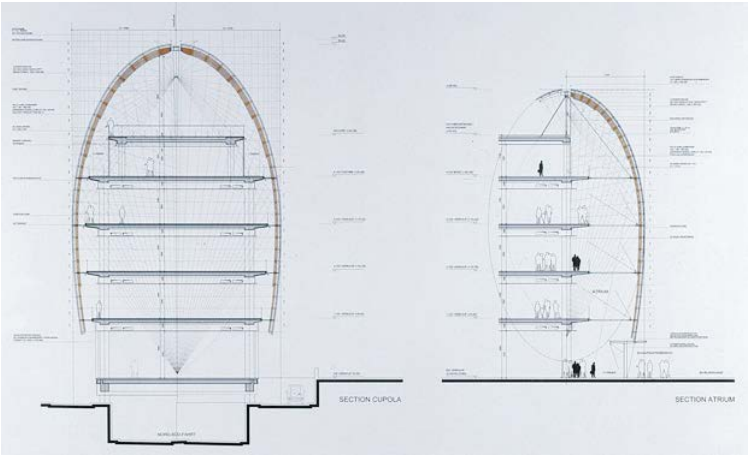


Fonte: (a) FONTANA, 2007, p. 34; (b) KNIPPERS; HELBIG, 2009, p.123.

Essa forma acompanha dois lados consecutivos do bloco, os quais estão voltados para a igreja, criando uma curva que uni esses lados. Também, a forma da fachada projeta-se além do comprimento da lateral do bloco, gerando um volume arredondado que em planta se assemelha ao arco da metade de uma elipse. Ao longo desse volume seu corte transversal, também se assemelha ao arco de uma elipse (Figura 162a), mas quando margeia o bloco, a forma do corte diminui e se torna próximo ao arco de um quadrante da elipse (Figura 162b).

Figura 162 – Corte transversal mostrando a secção em formato próximo: (a) à elipse; (b) ao quadrante da elipse

(a) (b)

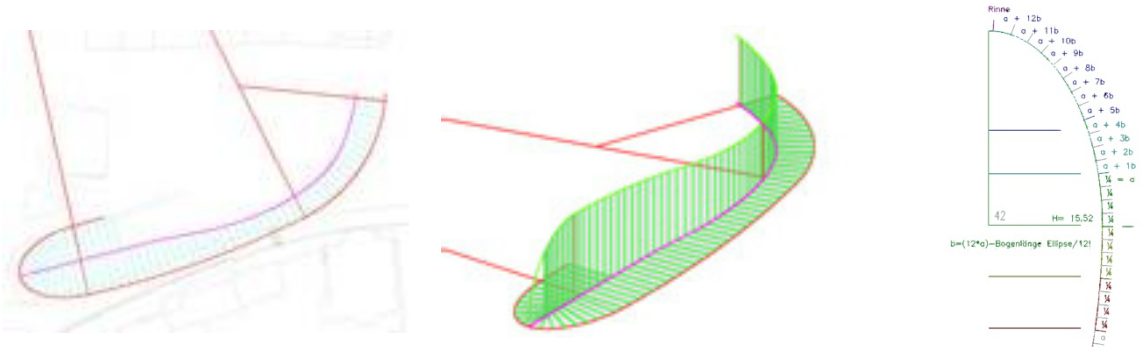


Fonte: FONDAZIONE RENZO PIANO, 2012.

Renzo Piano contratou a empresa Designtoproduction para prestar consultoria na criação do modelo paramétrico dessa fachada envidraçada e na otimização do processo de fracionamento da geometria em painéis planos (SCHEURER, 2010, p. 88), de modo a criar a cortina de vidro dessa fachada. Essa empresa, encabeçada por Arnold Walz, modelou a fachada utilizando-se de três curvas: a definidora do perímetro (Figura 163a), a definidora do ápice do eixo central (Figura 163b) e a secção elíptica (Figura 163c) (WALZ; KILIAN; SCHINDLER, 2009, p. 58). Em um processo similar a geração de superfícies por varredura[128] (Figura 164a), que nesse caso, as linhas do perímetro e ápice seriam as diretrizes e a secção elíptica a geratriz.

Figura 163 – (a) Perímetro da fachada em planta baixa; (b) alinhamento do eixo principal da fachada com o perímetro; (c) secção elíptica

(a) (b) (c)



Fonte: ARNOLD WALZ ARCHITECT, 2012.

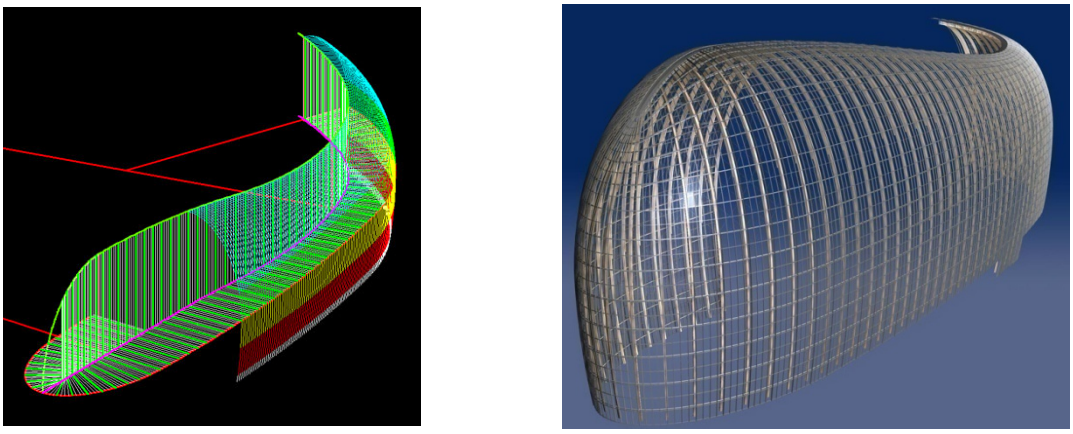
Como essa fachada possui grandes dimensões (altura de 30 m), a escolha dos materiais foi guiada por opções leves que não causassem sobrecarga na estrutura. Além disso, os materiais foram selecionados pelo seu custo benefício e flexibilidade de utilização, bem como a possibilidade de encurtar o tempo de construção, que terminou em 2005 (FONTANA, 2007,

[128] Ver detalhes no item 3.2.2.1.4, sobre criação de superfície por varredura.

p. 34). Desse modo, o resultado estrutural (Figura 164b) é baseado em arcos de madeira verticais a cada 2,5 m, com o contraventamento em tubos de aço horizontais e cabos de aço dispostos em cruz entre as vigas. Esses elementos sustentam a cortina de vidro composta por seis mil e quinhentos paineis produzidos por equipamentos CNC (FONTANA, 2007, p. 34).

Figura 164 – (a) Esboço do modelo paramétrico para a geração da fachada; (b) modelo geométrico da estrutura

(a) (b)



Fonte: (a) DESIGNTOPRODUCTION, 2012; (b) ARNOLD WALZ ARCHITECT, 2012.

4.3 Obras Selecionadas para os Estudos Empíricos

Nesse item serão apresentadas as obras arquitetônicas selecionadas a partir do panorama para serem usadas nos estudos empíricos, esses últimos serão apresentados no Capítulo 5. Decidiu-se por limitar a escolha à três obras, de modo a ser compatível com a dimensão do trabalho de mestrado em questão.

Para realizar a escolha dessas obras foram aplicados certos critérios de seleção, mas sem a obrigatoriedade de possuir todos, ou seja, possui pelo menos um dos seguintes itens:

a) Acesso a todo ou a partes do conjunto documental do projeto da obra arquitetônica;
b) A “forma geral” da obra deve possuir características favoráveis a serem produzidas pela modelagem paramétrica. Por exemplo, que essas características possam ser transformadas em parâmetros chave, mediante as operações de modelagem, de modo a criar as variações paramétricas da obra;
c) Caso não se tenha acesso ao processo de concepção formal da obra, pode-se deduzir um procedimento para a geração da “forma geral” da obra;
d) Procurar selecionar edificações que possuam a “forma geral” diferente uma das outras, de modo a demonstrar a versatilidade da modelagem paramétrica, e
e) Desempate:
    1. Não repetir obras do mesmo país ou do mesmo arquiteto, e

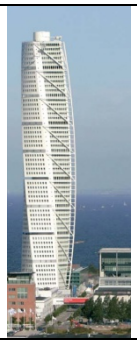
2. Selecionar a obra de data de construção mais recente.

Ao aplicar tais critérios, das sete primeiras obras (ver Quadro 7), somente o *Pavilhão FreshH2Oexpo* e o *Bubble BMW Pavilion* dispunham informações sobre sua concepção formal ou poderia ser deduzido um procedimento para a geração da sua forma. As demais obras, junto com a Loja Selfridges de Birmingham, Museu Kunsthaus de Graz e Disney Concert Hall, não se enquadravam em formas clássicas ou casos especiais da Geometria. Também, seus processos de geração de formas eram baseados ora em modelagem de formas livres[129], ora em digitalização de maquetes de estudos volumétricos. Ambos os procedimentos, não favoreceriam a demonstração da versatilidade da modelagem paramétrica. Devido a esses fatos, não foram consideradas para a experiência empírica as obras de número 1, 3, 4, 6, 7, 11, 12 e 13 (ver Quadro 7), restando ainda 12 obras.

Além desses critérios, algumas tentativas preliminares de modelar algumas dessas obras foram realizadas, de modo a buscar quais características formais poderiam ser transformadas em parâmetros chaves para as variações paramétricas.

Após essa análise, chegou-se ao resultado dessa seleção de obras para o estudos empírico que está apresentado por meio do Quadro 8.

Quadro 8 – Obras selecionadas para os estudos empíricos

(a)	(b)	(c)
		
HSB Turning Torso, 2005 - Santiago Calatrava	30 St. Mary Axe, 2004 - Foster and Partners	Estádio Allianz Arena, 2005 - Herzog & de Meuron

Fonte: (a) KONE CORPORATION, 2006, p. 9; (b) JENCKS, 2005, p. 13; (c) FISCHER, 2007, p. 476.

[129] Essa modelagem é mais compatível com uma interface interativa, ou seja, uma interface de *direct manipulation* (ver item 2.1.6).

5 Os Estudos Empíricos de Modelagem Paramétrica

O presente Capítulo dá a continuidade a fase empírica da pesquisa, iniciada no Capítulo 4. Nessa etapa será apresentada a aplicação direta da Modelagem Paramétrica ao se "construir" as três obras escolhidas do panorama da produção recente da arquitetura contemporânea, de modo a exemplificar os procedimentos desse tipo de modelagem em obras arquitetônicas. Cada uma dessas modelagens foi chamada de estudo empírico, pois evitou-se usar os termos estudo de caso ou experimento.

O primeiro termo, "[...] é caracterizado pelo estudo profundo e exaustivo de um ou de poucos objetos, de maneira a permitir o seu conhecimento amplo e detalhado." (GIL, 1999, p. 72). E, portanto, não se enquadra no trabalho em questão, uma vez que o mesmo não buscou produzir um modelo geométrico detalhado ou exato das edificações selecionadas, mas sim, um modelo aproximado com medidas equivalentes e que representasse as características formais mais marcantes das obras, ou seja, sua "forma geral externa". Isso por que o presente trabalho se insere na fase preliminar do projeto, pois procura ampliar os conhecimentos e o entendimento do potencial da Modelagem Paramétrica na concepção arquitetônica.

O segundo termo, experimento, é caracterizado pelo estudo de fenômenos em ambientes com determinadas formas de controle (geralmente bem restritas) e de observação sobre os efeitos da introdução de novos fatores a esse fenômeno (GIL, 1999, p. 66). Também, não é adequado, pois, a modelagem em si não pode ser classificada como um fenômeno a ser observado, no sentido tradicional da pesquisa científica.

Assim, escolheu-se "estudo empírico", pois a própria autora realizou os procedimentos de modelagem, observou a prática dessa técnica e descreveu pormenorizadamente em etapas todo esse processo. Essa flexibilidade metodológica se tornou presente na pesquisa, visto que a mesma se insere em um tema ainda pouco explorado e, assim, possui caráter exploratório.

Deve-se ressaltar que a descrição do processo de modelagem não possui como objetivo, ensinar a um possível leitor como representar formas em uma ferramenta de modelagem paramétrica específica, ou seja, criar um tutorial de aprendizagem de um programa em particular. Mas sim, explicar os princípios básicos dos procedimentos de modelagem paramétrica, de modo a desenvolver um conhecimento conceitual sobre o assunto e assim possibilitar não só a aplicação dele em qualquer ferramenta, mas também proporcionar a capacidade de avaliação dessas ferramentas pelo leitor. Esse conhecimento conceitual foi construído ao se traçar paralelos com o conjunto de informações adquirido da revisão

bibliográfica. Principalmente, destacando as características específicas da Modelagem Paramétrica, apresentadas no item 2.2, e apoiando-se nas técnicas de geração e transformação de superfícies vistas no item 3.2.2.

Em linhas gerais, o presente Capítulo é desenvolvido em três partes. Primeiro é apresentada uma visão geral da ferramenta usada nos estudos empíricos, seguido da descrição do processo de modelagem das edificações escolhidas e por fim, uma análise comparativa entre os estudos.

5.1 Ferramenta usada nos Estudos Empíricos

Nesse item é apresentada uma visão geral e simplificada da ferramenta usada para a realização dos estudos empíricos, o Grasshopper (GH). Nessa apresentação descrevu-se as características gerais do GH, focando-se nas capacidades dessa ferramenta em produzir as características específicas da Modelagem Paramétrica. Com essa apresentação espera-se criar um conhecimento mínimo sobre a ferramenta de modo a ajudar no entendimento da implementação no GH dos processos de modelagem dos estudos empíricos.

5.1.1 *Plug-in* Grasshopper

Como visto no item 2.1.6, na década de 2000 houve uma retomada do interesse no emprego de linguagens de programação para a construção de modelos paramétricos, principalmente, mediante o suporte à programação (*end-user programming*) oferecido pelas ferramentas CAD (MCCULLOUGH, 2006). Principalmente, devido à introdução de linguagens de programação visual nesse suporte com o surgimento de novas ferramentas, das quais se tem como exemplo o Grasshopper.

O GH foi criado em 2007 por David Rutten na empresa McNeel & Associates (DAVIS; BURRY; BURRY, 2012, p. 363) e se encontra em desenvolvimento até hoje, visto que novos recursos são adicionados e/ou alterados com freqüência. Para os estudos empíricos foi usada a versão 0.8.0066. Apesar dessa ferramenta ainda não ter sua versão 1.0 oficial lançada, seu uso tem crescido pelo mundo e está sendo empregado em várias áreas de projeto, como a de jóias e de arquitetura.

O GH é um *plug-in*[130] implementado para a plataforma do Rhinoceros, portanto somente funciona no ambiente deste programa, utilizando seus recursos, e não independentemente. E como outros *plug-ins*, o GH possui o objetivo de acrescentar funcionalidades específicas a um programa (WOODBURY, 2010, p. 65). Neste caso, o GH possibilita ao usuário controlar, associar, otimizar e a automatizar as operações de modelagem do Rhinoceros através da construção de um *script*[131]. Assim, o GH produz conjuntos de instruções (*script*) de modelagem e não modelos geométricos em si, tanto que o *script* é armazenado em um arquivo específico do GH, chamado Definition.

As formas criadas pelo GH são visualizadas no ambiente do Rhinoceros, enquanto no GH somente se visualiza o *script* em si. Essas formas não podem ser manipuladas por ferramentas do Rhinoceros, uma vez que se configuram como uma imagem representativa do modelo criado pelo *script* do GH. De fato, essa imagem não pode ser manipulada diretamente, no sentido de *direct manipulation*[132], mas apenas de forma indireta pela alteração das instruções de modelagem contidas no *script*. Essas modificações são realizadas automaticamente pelo GH, para cada manipulação do *script*, ao contrário do *variant programming*[133]. Uma vez terminada a manipulação dessa imagem, pode-se transformá-la em um modelo geométrico ao exportá-la do GH para o Rhinoceros.

Usualmente, a elaboração de um *script* é realizada mediante um algoritmo e uma linguagem de programação, que formalizam as ações a serem desenvolvidas de forma automática. Isto ocorre de maneira análoga no processo de modelagem através do GH. Tais características serão apresentadas em maiores detalhes no item a seguir.

5.1.2 Abordagem algorítmica de modelagem

Conforme Tedeschi (2011, p. 15), essa abordagem (Figura 165) encara a construção de modelos geométricos como um algoritmo, ou seja, um problema que será resolvido através da

---

[130] *Plug-in* é um pequeno programa que usa os recursos de um programa maior e normalmente oferece personalização ou recursos adicionais (HENDERSON, 2009, p. 374).

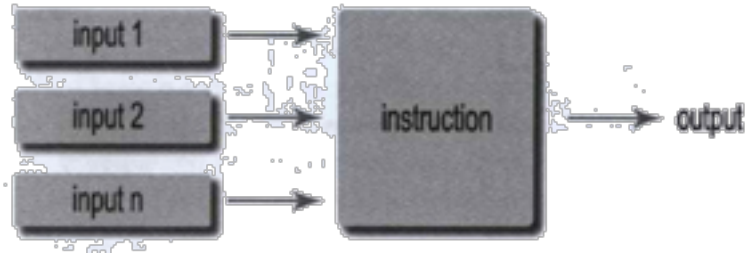
[131] *Script* é um modo de representação, de médio nível de abstração, para dar instruções ou comandos a serem realizados por um computador. Mais especificamente, é um roteiro que contém uma sequência de passos que orientam a realização de um conjunto de instruções. Geralmente, esse roteiro é representado por instruções em forma de texto, mediante uso de linhas de comando, diferentemente do uso de representações gráficas como ícones - a saber, *graphical user interface* (GUI) - modo de comandar sistemas operacionais mais comum atualmente (HENDERSON, 2009).

[132] Interface que passa a sensação de manipular diretamente os objetos visualizados no programa de modelagem, e não através de comandos de modelagem do programa em si (MALEKI; WOODBURY, 2010, p. 120).

[133] Ver final do item 2.1.4, sobre customização de ferramentas CAD genéricas.

especificação de uma seqüência de instruções em etapas, a partir de uma entrada de dados inicial (*input*), de modo a gerar a forma como resultado, chamado de dados de saída (*output).*

Figura 165 – Esquema de representação gráfica de um algoritmo

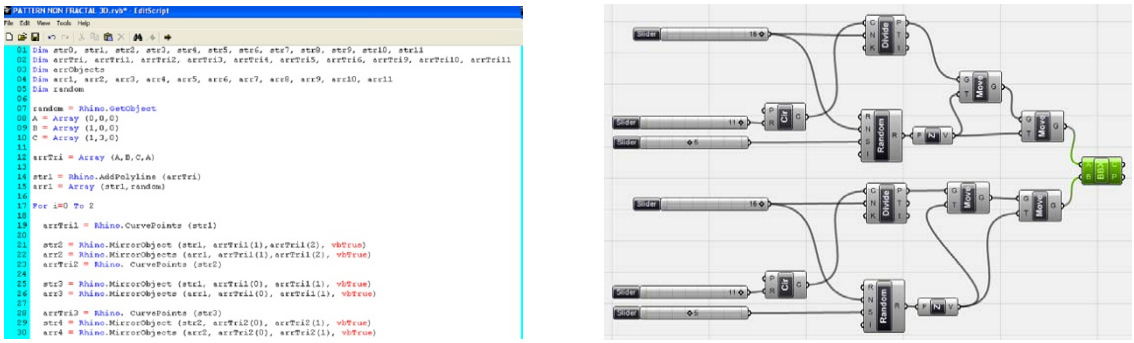


Fonte: TEDESCHI, 2011, p. 15.

Comumente, em outros *plug-ins*, essas instruções são descritas por intermédio de linguagem de programação em forma de texto numa interface baseada em linha de comando, a exemplo do Rhinoscript (Figura 166a). De maneira diferente, o GH trabalha com uma interface em linguagem iconográfica (Figura 166b), que representa uma versão gráfica desses algoritmos de maneira semelhante as linguagens de programação visual[134], as quais se utilizam de fluxogramas. Esse é um sistema de conexões (*link*) entre ícones que mostra a direção do fluxo das ações do *input* ao *output*. O encadeamento das ligações entre esses ícones representa a sequência de instruções de modelagem para se criar um modelo geométrico.

Figura 166 – Interface de linguagem de programação: (a) por linha de comando do Rhinoscript; (b) iconográfica do GH

(a) (b)



Fonte: KHABAZI, 2009.

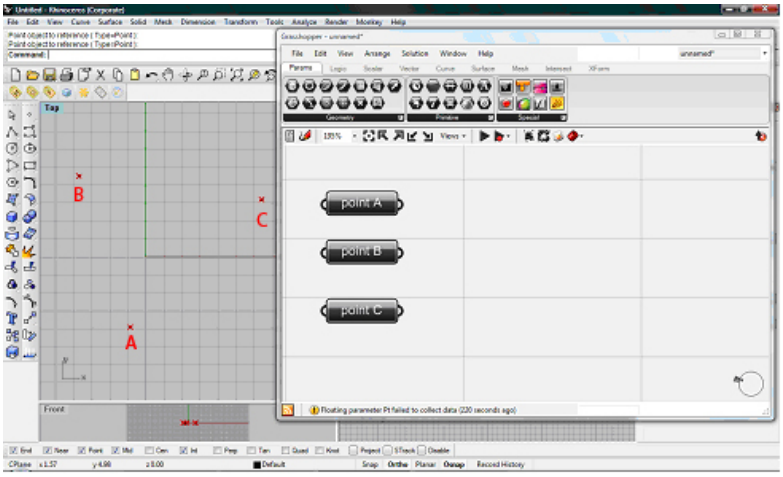
Em maiores detalhes, um ou mais ícones representam uma etapa da modelagem que deve ser seguida pela próxima etapa. Cada etapa possui um *input* específico que após a execução da operação de modelagem produz um *output*, o qual será utilizado como *input* na próxima etapa. Essa sequência de *inputs* e *outputs* é o fluxo de ações do fluxograma, o qual é chamado de ***Defintion*** no GH.

[134] Ver item 2.1.6.

No GH, esses ícones foram divididos em dois tipos de elementos: o componente e o parâmetro. O primeiro representa qualquer operação de modelagem, enquanto o segundo representa dados como dimensões, ângulos, raios ou objetos geométricos.

Para demonstrar essa abordagem algorítmica na construção de um elemento geométrico, apresenta-se como exemplo a criação de um triângulo qualquer. Para isso são necessários três pontos e três segmentos de reta. No GH, os pontos são os parâmetros ou *input*, pois contém a informação inicial, que é a sua localização. Enquanto o segundo são componentes, pois são a operação de modelagem, ou seja, traçam o segmento de reta entre dois pontos escolhidos. Assim, para modelar um triângulo no GH, o primeiro passo é selecionar o ícone do comando ponto e criar três pontos, A, B e C (Figura 167).

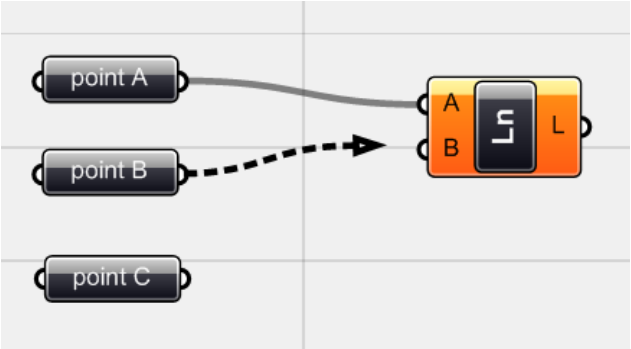
Figura 167 – Três pontos criados no GH (janela da frente) e representados no Rhinoceros (janela de fundo)



Fonte: KHABAZI, 2009.

O segundo passo é criar o segmento de reta entre ponto A e B, ao se ligar o parâmetro ponto com o componente linha[135] (Figura 168), que é a operação de desenhar o segmento de reta. Em seguida repete-se a mesma ação para criar os demais segmentos de reta.

Figura 168 – Conectando os ícones dos pontos A e B (à esquerda) com o ícone da linha (à direita) no GH

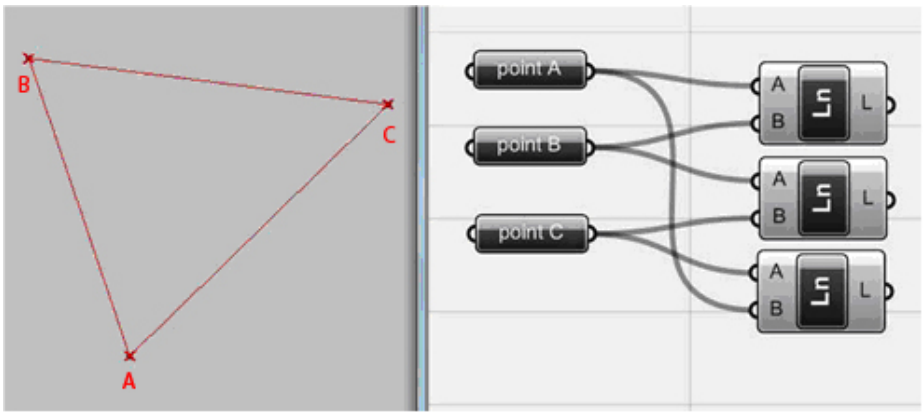


Fonte: KHABAZI, 2009.

[135] Que no GH cria segmentos de restas entre pontos selecionados.

Na Figura 169, pode-se ver, a esquerda, um recorte da janela do Rhinoceros (com fundo cinza escuro) aonde o triângulo é representado, e a direita, um recorte da janela do GH (com fundo cinza claro) com a **definition** que mostra a ligação entre os pontos e os segmentos de reta, de modo a formar o triângulo.

Figura 169 – Modelagem de um triângulo pelo GH



Fonte: KHABAZI, 2009.

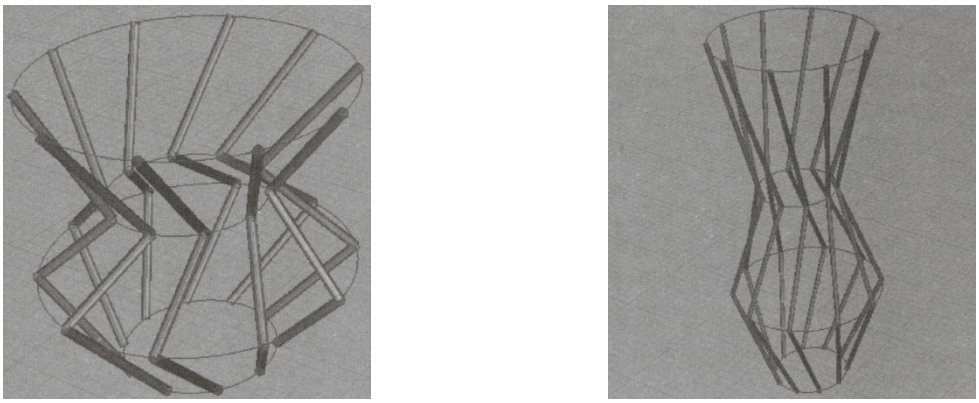
Uma vez que um **definition** é criado no GH para construir um tipo de objeto, o mesmo pode ser usado para construir diferentes objetos do mesmo tipo, através da alteração da entrada de dados inicial, pois cada *input* diferente resulta em um *output* distinto. Por exemplo, se fossem alterados os pontos iniciais no **definition** usado na criação do triângulo da Figura 169, seria construído um triângulo diferente.

Além da geração de formas geométricas, o GH pode articular um ou vários elementos geométricos entre si, através de um conjunto de regras que regulam o comportamento e as interações dos elementos que compõem o modelo. Por exemplo, usando-se de funções lógicas e operações de manipulação de dados (ver item 5.1.3, a seguir). Tal procedimento, de um modo geral, organiza os elementos do modelo em sistemas ou hierarquias. Em cada nível ou etapa desse arranjo, um ou mais atributos destes elementos são definidos para se tornarem um dos parâmetros (*input*) de outros elementos do nível seguinte, e assim sucessivamente para produzir um objeto formado por elementos geométricos associados entre si.

Por exemplo, na Figura 170, o modelo foi construído a partir da conexão de atributos das circunferências com os cilindros. Em detalhes, se dividiu as três circunferências em dez partes iguais, cada ponto dos arcos resultantes foi definido como centro das bases inferiores e superiores das três fileiras de cilindros, que possuía um raio definido. Caso as circunferências sejam modificadas, os cilindros também se alteram automaticamente, de modo a se manterem “associados” as circunferências.

Figura 170 – Variação do modelo devido a alteração no valor do raio das circunferências

(a) (b)



Fonte: TEDESCHI, 2011, p. 17.

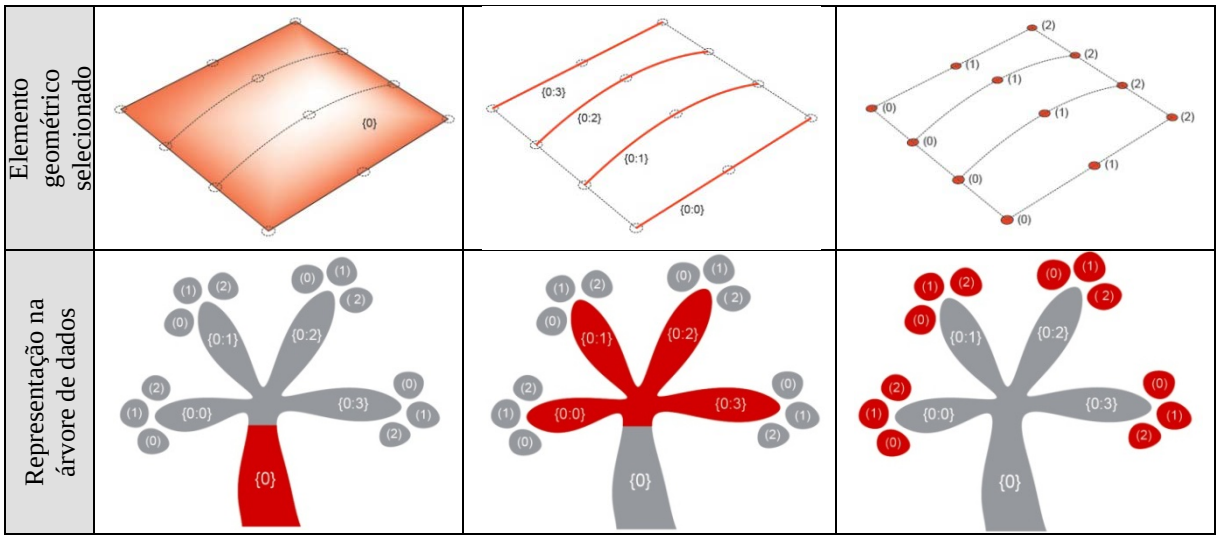
No GH, a criação de relações entre elementos depende da correta identificação tanto das formas geométricas, quanto de suas partes fundamentais, como vértices e arestas. Uma vez que a seleção desses elementos não pode ser realizada com o cursor do *mouse* (*direct manipulation*), mas sim pelos parâmetros e componentes do GH. Considerando-se modelos complexos, a exemplo de um arquitetônico, essa identificação pode chegar a reunir um grande número de elementos e assim se tornar confusa e difícil. Para organizar a identificação de tantos elementos, o GH trabalha estruturas similares as utilizadas para armazenar informações em bancos de dados nos computadores, a saber, listas e árvores de dados (*data tree*).

O primeiro é uma série de itens relacionados em ordem consecutiva, onde cada item possui uma identificação disposta em ordem numérica. Essa estrutura possibilita trabalhar com um ou com múltiplos itens, geralmente, do mesmo tipo de elemento geométrico. Por exemplo, a lista dos oito vértices de um cubo.

O segundo (*data tree*) é uma estrutura em hierarquia que faz analogia a estrutura tronco-galho de uma árvore, onde o tronco é o eixo principal da hierarquia e cada galho (*branch*) é uma subdivisão desse eixo, criando uma ordem de subordinação entre os dois. No GH, a árvore de dados é comumente utilizada para organizar as partes fundamentais de um elemento geométrico ou para selecionar múltiplos elementos do mesmo tipo em objetos diferentes.

No Quadro 9, apresenta-se a relação entre os elementos de uma superfície qualquer e sua indexação em uma representação gráfica de uma árvore de dados. Na primeira coluna, tem-se o tronco da árvore representando a superfície em si, enquanto na segunda coluna, os galhos representam as curvas geratrizes dessa superfície. Por fim, na terceira coluna, têm-se pequenos ramos que representam possíveis pontos de controle. Usualmente, esse último nível da árvore de dados é representado por uma lista.

Quadro 9 – Esquema ilustrativo da indexação dos elementos de uma superfície por uma árvore de dados



Fonte: SUNG, 2010.

Todo esse processo de organização em árvores de dados ou listas está na base da criação de relações entre diferentes elementos e também entre múltiplos elementos, possibilitando a criação de modelos complexos.

5.1.3 Gama de componentes do Grasshopper

O GH possui, à disposição do usuário, uma gama de parâmetros e componentes. O primeiro possui um leque de opções para contemplar o objetivo de importar do Rhinoceros para o GH alguma informação para criar o *input* da modelagem, como por exemplo, os pontos usados na Figura 167. Enquanto, os componentes possuem tão ampla variedade de itens em relação aos parâmetros que foram organizados, pelo desenvolvedor do GH, em oito categorias: funções matemáticas e lógicas, curvas, superfícies, *mesh*, vetores, interseções, transformações, e operações de manipulação de dados. Essas categorias possuem, por sua vez, subcategorias, cada uma com um número variado de operações de modelagem, que totalizam quatrocentos e sessenta comandos, aproximadamente. A descrição de tão extensa gama de operações é incompatível com a dimensão desse trabalho de mestrado, que focou apresentar as categorias e suas funcionalidades. Uma síntese dessas categorias e suas subcategorias podem ser vistas no Quadro 10.

Quadro 10 – Quadro síntese da gama de componentes do GH

CATEGORIAS	SUBCATEGORIAS	CATEGORIAS	SUBCATEGORIAS
Funções matemáticas e Funções lógicas	Operações Booleanas	Superfícies	Análises
	Domínio de função		Free-form
	Operações		Primitivas
	Polinômios		Utilidades
	Script	*Mesh*	Primitivas
	Trigonometria		Triangulação
	Utilidades		Utilidades
Curvas	Análises	Vetores	Cores
	Divisões		Malha (grid)
	Primitivas		Planos
	Spline		Pontos
	Utilidades		Vetores
Interseções	Matemática	Transformações	Afins
	Física		Euclidianas
	Região		Morph
	Forma		Utilidades
Operações de manipulação de dados	Listas		
	Sequências numéricas		
	Conjuntos		
	Strings		
	Árvore de dados		

Fonte: prória autora

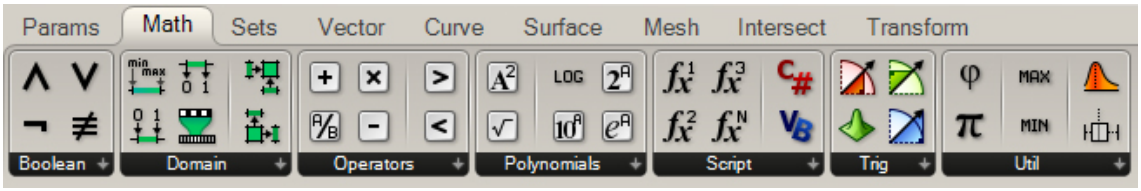
5.1.3.1 Funções Matemáticas e Funções Lógicas (*Math*)

Os componentes na categoria de funções matemáticas permitem a utilização de funções e operações matemáticas para guiar a modelagem de formas. Por exemplo, pode-se gerar uma curva parábola mediante a aplicação da função de segundo grau correspondente, ao invés de desenhar tal formato. Nessa categoria, tem-se operações matemáticas simples como adição e subtração, mas também constantes, como o Pi, funções polinomiais e trigonométricas. Dentre elas, deve se destacar a subcategoria Domínio (*Domain*), que trabalha com a criação de intervalos. Uma operação importante na geração de superfícies, uma vez que para a Geometria Diferencial[136] um segmento de uma superfície é um intervalo de duas dimensões paramétricas: "*u*" e "*v*". Logo, essa subcategoria possibilita a definição dos retalhos (*patch*) de uma superfície de forma livre.

[136] Ver item 3.2.1.2, sobre definições de superfícies.

Por outro lado, essa categoria também abriga funções lógicas, como as booleanas. Na linguagem de programação essas funções controlam a execução do *script*, informando quando se deve executar alguma linha de comando. Na modelagem, essas funções podem controlar quando se deve executar determinada operação. Por exemplo, a seleção de elementos ou objetos, sobre os quais deve ser aplicada uma operação. Essa seleção funciona como um filtro e pode trabalhar com múltiplos elementos.

Figura 171 – Visualização do *menu* com as opções de operações da categoria funções matemáticas e funções lógicas



Fonte: inerface do GH

5.1.3.2 Curva e Superfície

Curva (*Curve*) e superfície (*Surface*) são categorias que geram as representações de curvas[137] e superfícies, mas também métodos de extrair informações sobre esses elementos geométricos. Essas informações podem se tornar o *input* de outra etapa de modelagem.

Na categoria Curva, pode-se agrupar suas subcategorias em três grupos. No primeiro (1) tem-se Primitivas (*Primitive*) e *Spline*, enquanto no segundo (2) tem-se Análise (*Analysis*) e Divisões (*Division*). E no terceiro (3) tem-se Utilidades (*Util*). No primeiro grupo (1), as operações criam diferentes tipos de curvas a partir de dados de entrada (*input*). Por exemplo, pode-se definir uma curva a partir de quatro pontos importados do Rhinoceros ou gerar uma circunferência ao se definir seu raio, de maneira similar a um *template*[138] (meta-modelo). No segundo grupo (2), se extrai informações sobre as curvas, principalmente, pontos e planos de referência. Por exemplo, pode-se localizar o centro de uma circunferência ou definir a curvatura de uma curva. Por fim, o terceiro grupo (3), modifica algumas propriedades da curva, como estender seu comprimento ou alterar sua continuidade geométrica (G^x)[139].

Figura 172 – Operações da categoria curvas

Fonte: inerface do GH

[137] Dentro de curvas e superfícies se encontram retas e planos, não somente elementos geométricos curvilíneos.
[138] Ver item 2.2.2.1.
[139] Ver item 3.2.1.1, sobre definição de curvas.

Do mesmo modo que a categoria anterior, a de Superfícies pode ter suas subcategorias agrupadas em três grupos. No primeiro (1) tem-se Primitivas (*Primitive*) e *Freeform*, enquanto no segundo (2) tem-se Análise (*Analysis*), e no terceiro (3) tem-se Utilidades (*Util*). No primeiro grupo (1), as operações criam diferentes tipos de superfícies a partir de dados de entrada ou de processos de geração de superfície. Por exemplo, pode-se gerar superfícies por primitivas geométricas ou por varredura. No segundo grupo (2), se extrai informações sobre as superfícies, principalmente, pontos e curvas. Por exemplo, definir a normal de um ponto sobre a superfície, ou a curvatura principal. Por fim, o terceiro grupo (3), modifica algumas propriedades da superfície. Por exemplo, pode-se inverter as normais de uma superfície de modo a alterar sua orientabilidade no espaço.

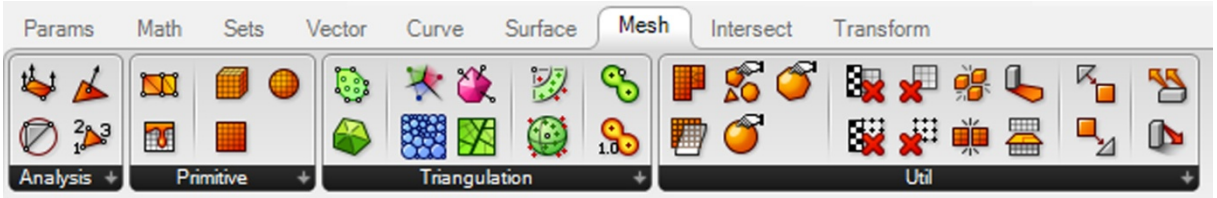
Figura 173 – Operações da categoria superfície

Fonte: inerface do GH

5.1.3.3 *Mesh*

Na categoria *Mesh* se encontram métodos de geração de superfície especiais, no sentido que não pertencem a definição padrão do GH, ou seja, não são NURBS. Nessa categoria pode-se trabalhar com *metaball*[140] e *mesh*[141], incluindo dois métodos bem conhecidos: *Delaunay triangulation* e *Voronoi tessellation*[142]. Esses últimos são mais indicados para trabalhar com nuvens de pontos (SAXENA, SAHAY, 2005, p. 298).

Figura 174 – Operações da categoria *mesh*



Fonte: inerface do GH

---

[140] Ver maiores detalhes no item 3.2.2.2.2, sobre Transformações de Combinação.

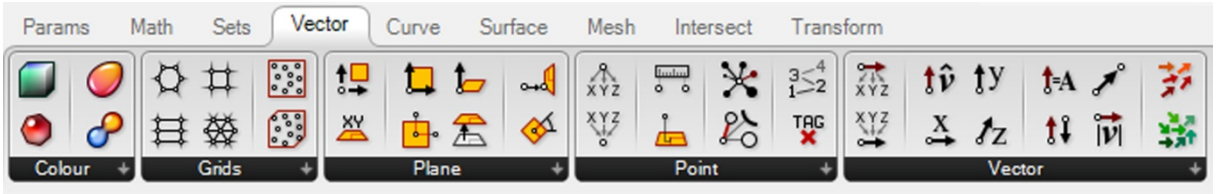
[141] Corresponde ao modo de representação do modelo geométrico, chamada Faces poligonais. É a divisão de uma superfície por um ou mais tipos de polígonos justapostos criando uma malha espacial, sendo o polígono mais comum o triângulo (AZEVEDO; CONCI, 2003, p. 127).

[142] O método Delaunay foi nomeado após o matemático Boris Delaunay e cria uma malha sobre uma superfície qualquer a partir da justaposição de triângulos. O método Voronoi foi nomeado após o matemático Georgii Voronoi e cria uma malha irregular sobre uma superfície com *n* pontos a partir da justaposição de polígonos convexos, tal que cada polígono contém exatamente um ponto e cada ponto em um determinado polígono está no máximo equidistante ao próximo ponto.

5.1.3.4 Vetores

Vetores (*Vector*) são elementos que possuem magnitude, direção e sentido. Geralmente, essa categoria ajuda nas ações de transformações geométricas, como a translação e rotação, provendo a direção e sentido dessas transformações. Além disso, os vetores ajudam na orientabilidade dos elementos no espaço, indicando planos de referência para execução de operações de modelagem ou a perpendicularidade entre elementos. Também é possível criar pontos, planos de orientação e *grids*.

Figura 175 – Operações da categoria vetores



Fonte: inerface do GH

5.1.3.5 Interseções

Essa categoria (*Intersect*) se dedica somente a vários tipos de interseções entre elementos geométricos criados pelo GH. Em quatro abordagens diferentes, representadas em quatro subcategorias: Matemática, Física, Região e Forma. A diferença entre elas está no resultado das interseções. As duas primeiras geram pontos e curvas resultantes da interseção entre os elementos, mas os mesmos não se alteram. Enquanto a Região divide um elemento em partes ou cria abertura(s) nele. Por fim a interseção Forma realiza operações Booleanas[143] em superfícies e curvas fechadas.

Figura 176 – Operações da categoria interseções

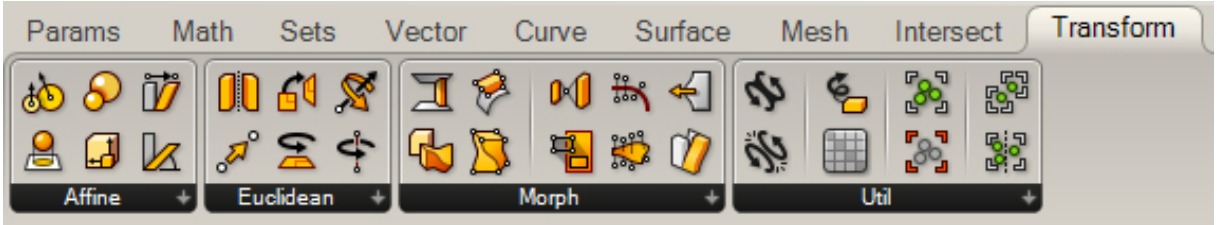
Fonte: inerface do GH

5.1.3.6 Transformações

Essa categoria (*Transform*) se dedica a realizar transformações sobre curvas e superfícies, como por exemplo, rotação, espelhamento, *morphing*, entre outros. Essas transformações foram descritas no item 3.2.2.2, sobre Métodos de Transformação de Superfícies.

[143] Ver maiores detalhes no item 3.2.2.2.2, sobre Transformações de Combinação.

Figura 177 – Operações da categoria transformações

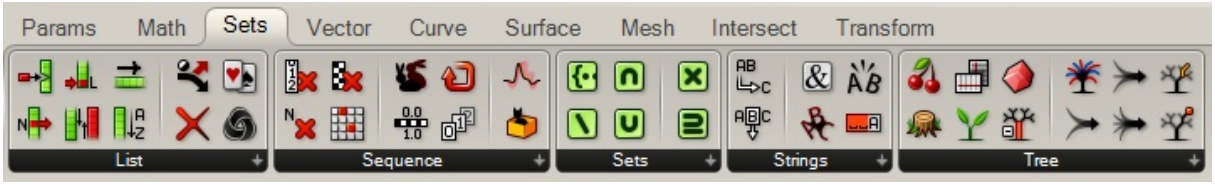


Fonte: inerface do GH

5.1.3.7 Operações de manipulação de dados

As operações de manipulação de dados servem para controlar o fluxo de dados dentro da ***definition***, especialmente quando se trabalha com um objeto complexo e que possui um grande número de elementos. Possui uma subcategoria somente para lidar com as listas (*list*) e outra para trabalhar as árvores de dados (*tree*). Também, possui duas subcategorias que organizam seqüências numéricas (*Sequence* e *Sets*), que podem, por exemplo, criar seqüências numéricas organizadas de pontos ou aplicar métodos randômicos para selecionar de um conjunto de circunferências qual será extrudada para gerar um cilindro.

Figura 178 – Operações da categoria operações de manipulação de dados



Fonte: inerface do GH

5.1.4 O Grasshopper como interface para Modelagem Paramétrica

Apesar de não se conhecer profundamente a programação e implementação do GH, foi possível estabelecer algumas características importantes do mesmo, de modo à enquadrá-lo como ferramenta para Modelagem Paramétrica, visto que seus próprios desenvolvedores não o definem como tal.

Com visto, no GH pode-se criar formas e modificá-las indiretamente pela alteração do **definition,** funcionando de maneira similar a um modelo parametrizado (implícito). No caso do GH, seus componentes podem ser considerados parametrizados, pois possuem o *input* em aberto, provavelmente, devido ao recurso de *history log*[144], que esse programa, também, deve possuir.

[144] Ver maiores detalhes no item 2.2, sobre Modelagem Paramétrica.

Além disso, os parâmetros das formas são declarados, à medida que o usuário pode criar relações entre parâmetros diferentes, mediante as ligações entre os componentes (ícones do **definition**) ou as operações de manipulação de dados. Por sua vez, essas relações entre os parâmetros, e por analogia entre as formas, podem ser apontadas como *constraints*. Pelo emprego dessas *constraints*, pode-se descrever relações semânticas entre as formas, ou seja, criar comportamento inteligente.

Ademais, como um único **definition** pode ser usado para construir diferentes objetos do mesmo tipo (instância) ao se alterar a entrada de dados inicial, pode-se considerar um **definition** como um meta-modelo de uma classe ou família específica de objetos. Consequentemente, indicando a capacidade do GH de gerar variações paramétricas.

Por todos esses aspectos descritos à cima, GH pode ser enquadrado como uma ferramenta de Modelagem Paramétrica, pois dessa maneira está de acordo com o conceito estabelecido no item 2.2.2.5, excetuando a presença de *features*. Mais especificamente, o GH é uma ferramenta de médio nível de generalidade, pois constrói as formas com elementos abstratos que mais à frente do processo de modelagem possam ser definidos como objetos inteligentes. Logo, é uma ferramenta indicada para dar suporte a fase de concepção do projeto de arquitetura, como comentado no item 2.2.2.4.

5.2 Estudo Empírico 1: Allianz Arena

No Estudo 1 foi modelado o Estádio Allianz Arena (Figura 179), localizado em Munique, na Alemanha, e projetado em 2001, pelo escritório Herzog & De Meroun. A descrição dessa obra foi realizada no item 4.2.19.

Figura 179 – Volumetria do Estádio Allianz

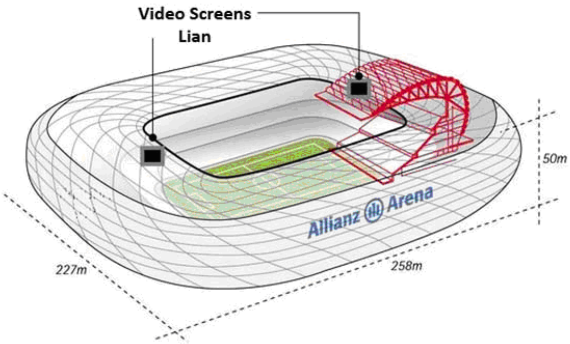
Fonte: JESKA, 2008, p. 129.

5.2.1 Levantamento de Informações

Inicialmente, foi realizado o levantamento das informações sobre as características gerais do estádio, especialmente no que toca a sua forma. Foram coletadas fotografias, plantas e cortes, das quais se pode destacar a planta de cobertura e o corte longitudinal, extraídos do livro *Transparent Plastics* (JESKA, 2008, p. 122-129). Estes elementos esquemáticos foram usados para confecção do gabarito para a modelagem da edificação.

Apesar dos desenhos não conterem as dimensões do estádio, a largura, o comprimento e a altura correspondentes a 227 x 258 x 50 metros, respectivamente, foram recuperados do texto. A Figura 180 mostra a forma geral da arena e as suas dimensões máximas.

Figura 180 – Esquema com forma geral do estádio e suas dimensões máximas

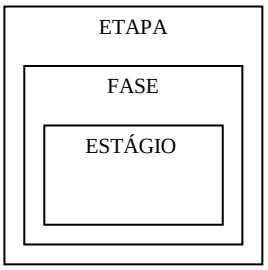


Fonte: LAREPUBLICA.PE, 2006.

5.2.2 Principais etapas da modelagem

O processo do Estudo 1 foi estruturado segundo a hierarquia em níveis: etapas dividas em fases, que por sua vez são subdividas em estágios, como exposto na Figura 181.

Figura 181 – Representação esquemática da hierarquia do processo de modelagem



Fonte: própria autora

Essa estrutura se desenvolve, para o Estudo 1 em três etapas e seus sub-níveis, como exposto a seguir:

Etapa 1: Confecção do Gabarito

Etapa 2: Modelagem da superfície externa de referência do estádio

a) Construção das curvas diretrizes (duas) e geratriz (uma)

b) Geração da superfície por varredura

Etapa 3: Modulação do fechamento do estádio com painéis de ETFE

a) Traçado da malha de painéis sobre a superfície externa de referência

b) Construção do elemento padrão do fechamento a partir do módulo da malha

b.1) Desenho do gabarito

b.2) Geração das superfícies do elemento padrão, utilizando modelagem de formas livres

c.) Ajuste da superfície final do estádio por *morphing*

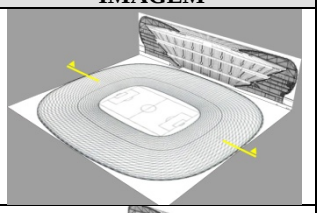
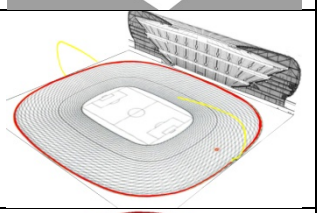
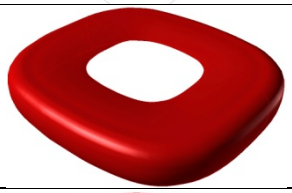
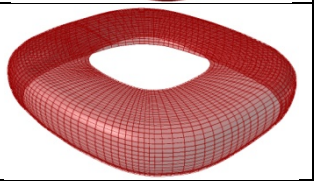
c.1) Inserção do elemento padrão de fechamento na "caixa fonte"

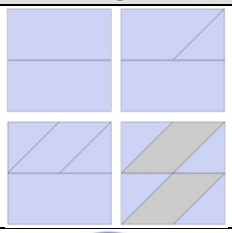
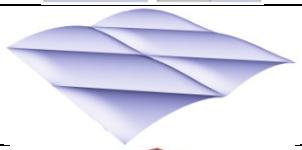
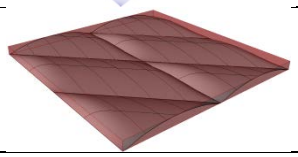
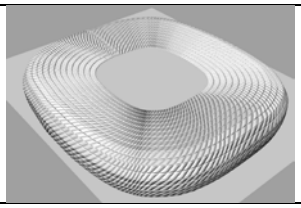
c.2) Inserção da "caixa alvo" em cada um dos módulos da malha da superfície de referência

c.3) Execução das "transformações contínuas" entre a "caixa fonte" e a "caixas alvo"

A síntese deste processo está contida no Quadro 11.

Quadro 11 – Quadro síntese do processo de modelagem do Allianz Arena

ETAPA	FASE	ESTÁGIO	SOFTWARE	IMAGEM
(1) Confecção do Gabarito			Rhinoceros	
(2) Modelagem da superfície externa de referência do estádio	(A) Construção das curvas diretrizes (duas) e geratriz (uma)		Rhinoceros	
	(B) Geração da superfície de referência por varredura		Grasshopper	
(3) Modulação do fechamento do estádio com painéis de ETFE	(A) Traçado da malha de painéis sobre a superfície externa de referência		Grasshopper	

ETAPA	FASE	ESTÁGIO	SOFTWARE	IMAGEM
(3) Modulação do fechamento do estádio com painéis de ETFE	(B) Construção do elemento padrão do fechamento a partir do módulo da malha	(b.1) Desenho do gabarito	Rhinoceros	
		(b.2) Geração das superfícies do elemento padrão, utilizando modelagem de formas livres	Rhinoceros	
	(C) Ajuste da superfície final do estádio por *morphing*	(c.1) Inserção do elemento padrão de fechamento na "caixa fonte"	Grasshopper	
		(c.2) Inserção da "caixa alvo" em cada um dos módulos da malha da superfície de referência	Grasshopper	
		(c.3) Execução das "transformações contínuas" entre a "caixa fonte" e a "caixas alvo"	Grasshopper	

Fonte: própria autora

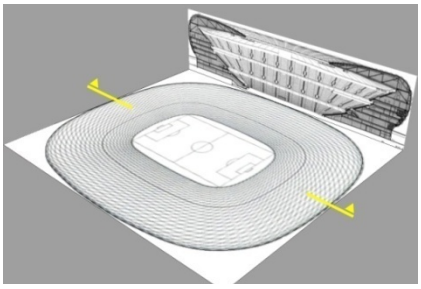
5.2.3 Descrição da construção do modelo

No presente item, detalha-se a modelagem com imagens representativas dos passos mais significativos.

5.2.3.1 Etapa 1: Confecção do Gabarito

Nessa etapa foi executado um gabarito para auxiliar a modelagem da forma geral do estádio, baseado na planta de cobertura e no corte longitudinal do mesmo. Estas imagens foram importadas, escaladas e dispostas perpendicularmente no ambiente de modelagem do Rhinoceros, com suas projeções alinhadas, como visto na Figura 182.

Figura 182 – Alinhamento entre corte e planta de cobertura, na qual se tem a indicação do corte



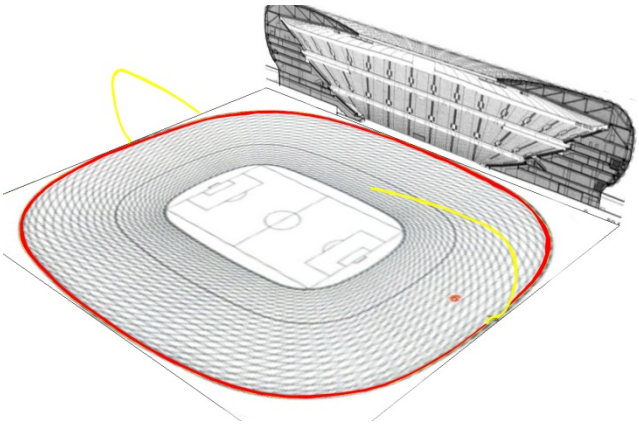
Fonte adaptada pela própria autora.

5.2.3.2 Etapa 2: Modelagem da superfície externa de referência do estádio

Nessa etapa foi gerada a superfície externa da forma geral do estádio, que foi utilizada como referência para a execução da Etapa 3. Essa superfície foi gerada utilizando-se de modelagem por varredura (*Sweep*), que, como visto no item 3.2.2.1.4, para ser executada possui como pré-requisitos, uma ou mais diretrizes e uma geratriz. Esse procedimento foi divido em duas fases: construção das curvas diretrizes (duas) e geratriz (uma) (A) e geração da superfície por varredura (B).

Na fase A, foram desenhadas três curvas sobre as imagens do gabarito, no ambiente de modelagem do Rhinoceros, sendo uma curva fechada (em vermelho na Figura 183) correspondente ao contorno da forma do estádio na planta de cobertura, enquanto as outras duas curvas abertas (em amarelo na Figura 183) correspondentes ao perfil do estádio no corte longitudinal. As duas curvas provenientes do corte foram alinhadas com a curva proveniente da planta (Figura 183), de modo que estejam em contato uma com a outra, para possibilitar a geração por varredura.

Figura 183 – Alinhamento entre as diretrizes (em amarelo) e geratriz (em vermelho)

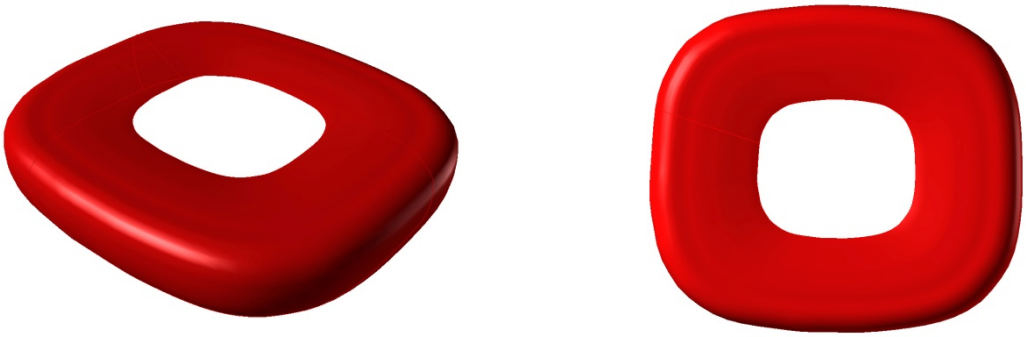


Fonte adaptada pela própria autora.

Na fase B, importou-se as curvas da fase A para o Grasshopper (GH) e gerou-se a superfície por varredura, usando-se como diretriz as curvas do corte e como geratriz a curva da planta, uma vez que o GH não aceita como diretriz uma curva paramétrica fechada.

Figura 184 – Superfície de referência gerada por varredura: (a) em perspectiva; (b) em planta;

(a) (b)



Fonte: própria autora.

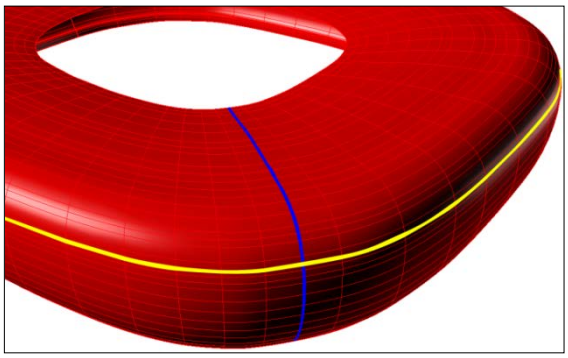
Nesse ponto, a superfície gerada (Figura 184) se assemelha ao formato primário do estádio, uma vez que deve funcionar como referência para definição da modulação do fechamento da edificação com os painéis de ETFE (em maiores detalhes no item a seguir), para aproximar ainda mais o modelo geométrico do objeto real.

5.2.3.3 Etapa 3: Modulação do fechamento do estádio com painéis de ETFE

Nessa etapa foi definida a modulação da superfície externa do estádio, que foi executada em três fases: traçado da malha de painéis sobre a superfície externa de referência (A), construção do elemento padrão do fechamento a partir do módulo da malha (B) e ajuste da superfície final do estádio por *morphing* (C).

Na fase A, a malha de painéis foi definida de maneira semelhante ao processo de definição de superfície de forma livre e seus retalhos. Como visto no item 3.2.1.2, essas superfícies são definidas por equações (paramétricas) de dois parâmetros, padronizados "*u*" e "*v*". Do mesmo modo, no GH, a malha foi determinada ao se dispor geratrizes seguindo as direções "*u*" e "*v*" (Figura 185) da superfície de referência, o que determinou o módulo a partir do qual foram realizadas as operações da fase seguinte.

Figura 185 – Geratrizes da malha sobre superfície de referência: direção "*u*" em amarelo e direção "*v*" em azul

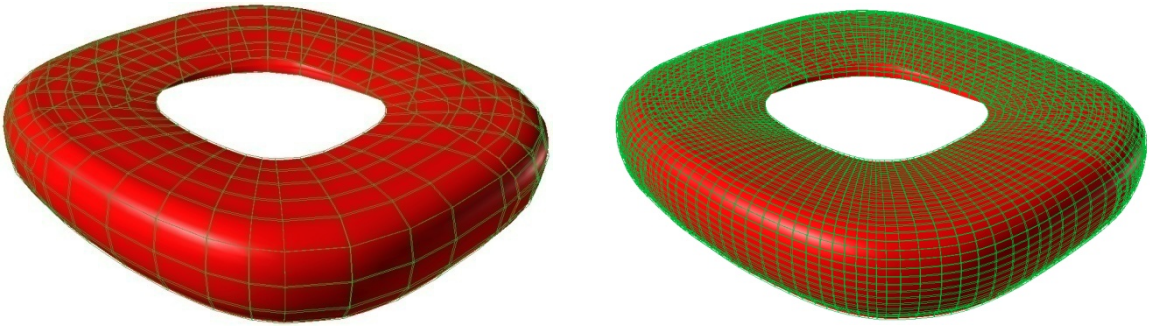


Fonte: própria autora.

Destaca-se, que o número de geratrizes a serem utilizadas foi parametrizado[145], ao tornar esses valores em dados de entrada (*input*) implícitos da definição da malha. Além disso, o número de geratrizes em uma direção é independente da outra, ou seja, a malha resultante não precisa ser uniforme. Por exemplo, na Figura 186 (a), observa-se 8 geratrizes na direção "*u*", e 33 na "*v*". Desse exemplo, nota-se a necessidade de mais geratrizes na direção "*v*" do que em "*u*", admitindo-se, por tentativas, 32 geratrizes na direção "*u*" e 112 na "*v*", como um resultado visualmente aproximado da superfície externa do estádio (Figura 186b).

Figura 186 – Exemplos de malhas, em verde: (a) 8 geratrizes em "*u*" e 33 em "*v*"; (b) 32 geratrizes em "*u*" e 112 em "*v*"

(a) (b)



Fonte: própria autora.

Nesse ponto, percebe-se que no projeto do estádio os painéis de ETFE formam uma malha não uniforme[146] onde uma direção das geratrizes está paralela ao solo, enquanto a outra direção está em diagonal, essa última não corresponde com a direção *v* da malha gerada no modelo geométrico. Para sanar essa diferença entre as malhas, foi necessário definir um elemento padrão de fechamento a partir do módulo da malha, de maneira que a sua repetição lado a lado possa criar a modulação em diagonal dos painéis de ETFE, mas sem emendas. Esse processo é descrito em maiores detalhes a seguir.

Na fase B, a construção do elemento padrão de fechamento foi executada no Rhinoceros em dois estágios: desenho do gabarito (b.1) e geração das superfícies do elemento padrão, utilizando modelagem de formas livres (b.2).

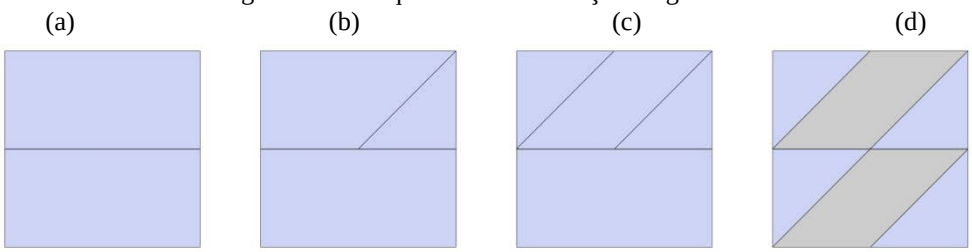
No estágio b.1, desenhou-se um gabarito para auxiliar a modelagem do elemento padrão (ver estágio b.2), baseado em uma configuração geométrica que permitirá estabelecer a modulação sem emendas. Esse desenho foi criado sobre um quadrado, correspondendo ao módulo da

[145] Esse valor pode ser modificado pelo usuário a qualquer momento e as alterações correspondentes serão automaticamente ajustadas pela ferramenta de modelagem paramétrica, neste caso, o Grasshopper. Maiores detalhes sobre parametrização no item 2.2.2.2.

[146] Neste caso, malha não uniforme é aquela que não possui o mesmo número de eixos nas duas direções.

malha, em uma sequência de passos demonstrados da Figura 187 (a) à 187 (d). O resultado são dois paralelogramos destacados em cinza na Figura 187 (d), representando cada qual, uma unidade do painel ETFE, além de quatro triângulos em azul, correspondendo a meia unidade.

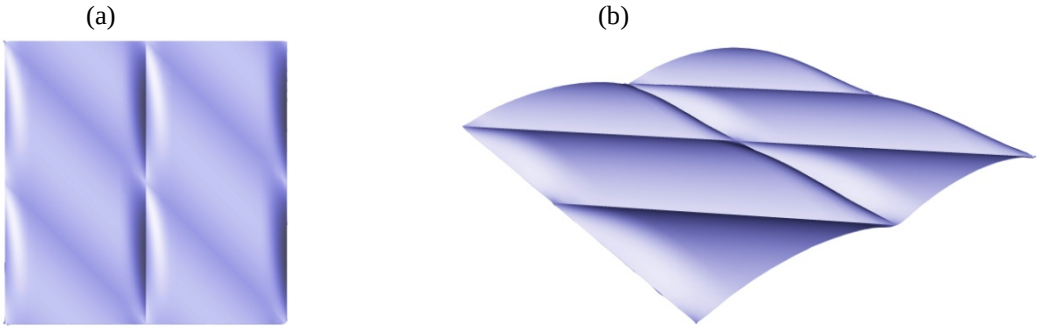
Figura 187 – Sequência de construção do gabarito



Fonte: própria autora.

No estágio b.2, utilizou-se a modelagem de formas livres para a geração da superfície do elemento padrão, que possui a forma curva para representar de maneira similar a membrana de ETFE dos painéis quando inflada, utilizando-se de modelagem de formas livres. Neste caso, foram definidos pontos de controle sobre a superfície plana do gabarito, os quais foram diretamente manipulados até atingir um resultado visualmente aproximado dos painéis de ETFE e que pode ser visto na Figura 188.

Figura 188 – Elemento padrão de fechamento; (a) vista superior; (b) em perspectiva



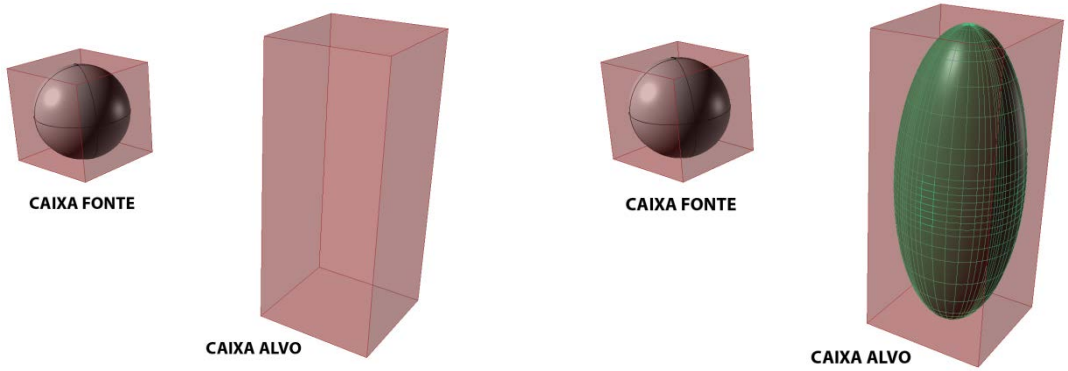
Fonte: própria autora.

Na Fase C, foi realizado ajuste da superfície final do estádio por *morphing*, técnica semelhante a descrita no item 3.2.2.2. No GH, o *morphing* é utilizado para gerar uma cópia similar de um objeto fonte (em *warp*[147]) para um *warp* alvo vazio, mediante transformações contínuas[148] entre os pontos e linhas de referência dos dois *warp*. Um exemplo simplificado desse procedimento, realizado no GH, está apresentado na Figura 189. Destaca-se que nesse exemplo, as caixas são a representação do *warp* e, por conveniência, serão usados os termos “caixa fonte” e “caixa alvo”.

[147] Ver item 3.2.2.2, sobre *morphing*.
[148] Ver item 3.1.6, sobre Topologia.

Figura 189 – Exemplo de aplicação do *morphing:* (a) antes; (b) depois

(a) (b)

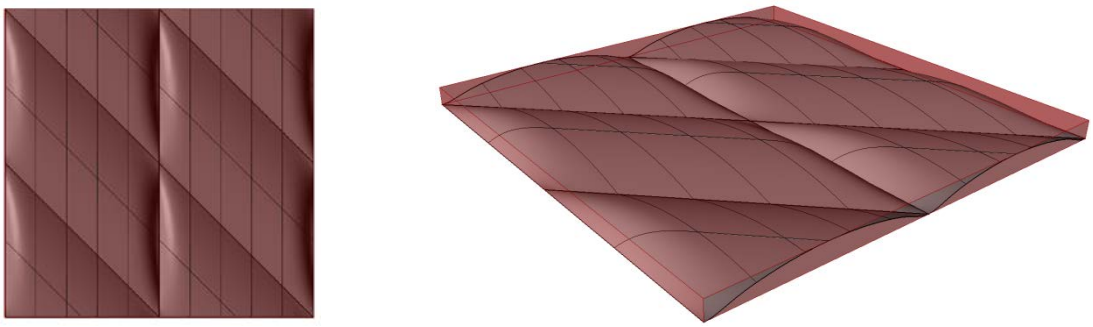


Fonte: própria autora.

A aplicação do *morphing* para o modelo do estádio foi executada em três estágios. Primeiro (c.1), inseriu-se o elemento padrão de fechamento na "caixa fonte" (Figura 190), a qual mapeou as características formais desse elemento. Segundo (c.2), inseriu-se uma "caixa alvo" em cada um dos módulos da malha da superfície de referência, sendo que essa relação foi determinada como uma *constraint* de hierarquia[149], de modo que ao se modificar o número de módulos da malha, o número de "caixas alvo" será automaticamente alterado pelo GH.

Figura 190 – Inserção do elemento padrão de fechamento na caixa fonte: (a) vista superior; (b) em perspectiva

(a) (b)



Fonte: própria autora.

Por último (c.3), executou-se as "transformações contínuas" entre "caixa fonte" e "caixas alvo", ou seja, o elemento padrão de fechamento foi ajustado automaticamente a modulação da superfície. Destaca-se que o GH executou todas as "transformações contínuas" simultaneamente, uma vez que a execução do *morphing* foi condicionada por uma *constraint* semântica de controle de dados[150], a qual indicou o número total de caixas fontes que deveriam receber a aplicação desse comando.

O modelo geométrico final é apresentado no item 5.2.4.

---

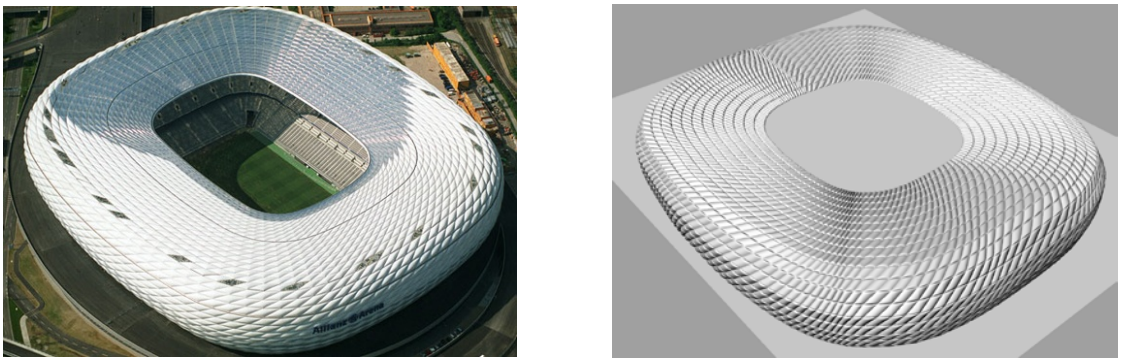
[149] Ver item 2.2.2.4, que trata de novos tipos de *constraint*.
[150] Ver item 2.2.2.4, que trata de novos tipos de *constraint*.

5.2.4 Apresentação do modelo final

Após a execução das etapas de modelagem descritas anteriormente, alcançou-se um modelo geométrico aproximado do Estádio Allianz Arena. As diferenças e semelhanças entre esse modelo e a obra original por ser vistas nas Figuras 191 e 192.

Figura 191 – Allianz Arena: (a) foto aérea da edificação; (b) modelo geométrico do estudo 1 criado no GH

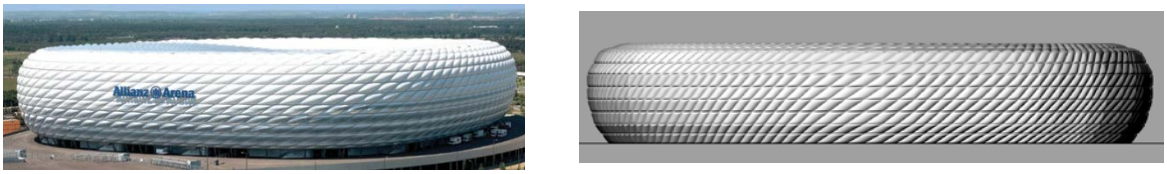
(a) (b)



Fonte: (a) JESKA, 2008, p. 129; (b) própria autora.

Figura 192 – Allianz Arena: (a) foto da edificação conluída; (b) modelo geométrico do estudo 1 criado no GH

(a) (b)



Fonte: (a) LEAL, 2006; (b) própria autora

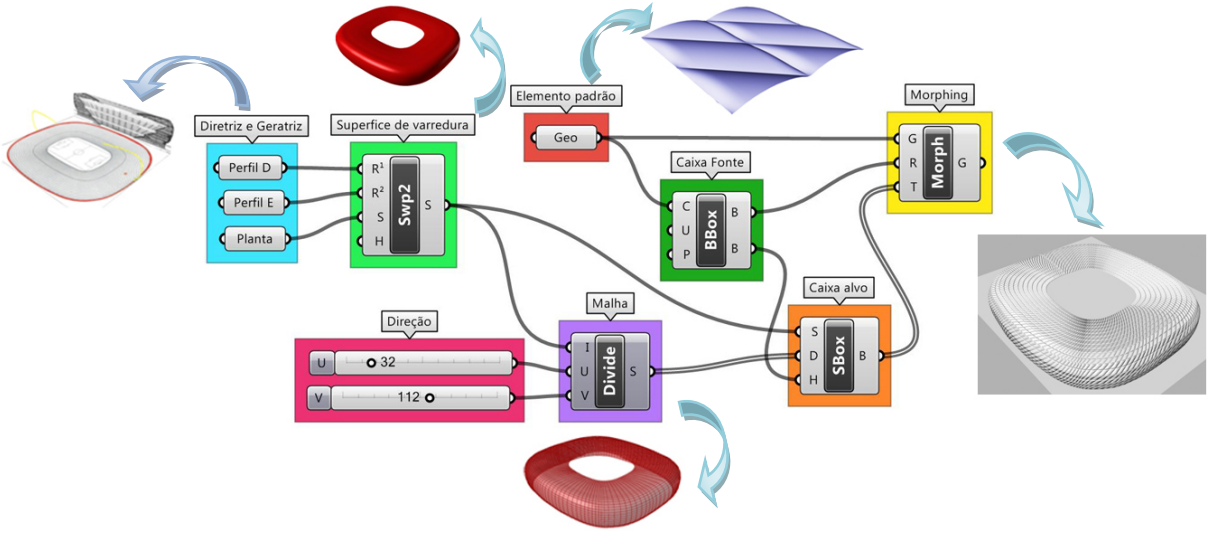
5.2.5 Aspectos da modelagem no Grasshopper

A *definition*[151] resultante do Estudo 1 pode ser vista na Figura 189. Nela estão indicadas as principais etapas de modelagem, as quais cada uma recebeu uma designação por cor. Os componentes que importaram, para o GH, as curvas diretrizes, que receberam o nome de **Perfil D** e **Perfil E,** e a geratriz com nome de **Planta,** estão identificados pela cor azul claro. A geração da superfície por varredura (fase B da etapa 2) está identificada pela cor verde claro. A definição da malha de painéis sobre a superfície externa de referência (fase A da etapa 3) está identificada pela cor lilás. À esquerda, sob o nome de direção e identificada pela cor rosa, estão dois componentes que parametrizaram o número de geratrizes da malha. O elemento padrão do fechamento foi importado para o GH pelos componentes que estão indicados pela cor vermelho. A inserção do elemento padrão de fechamento na "caixa fonte" (estágio c.1 da fase C da etapa3) está identificada pela cor verde escuro. Enquanto, a inserção

[151] Como visto no item 5.1, a *definition* representa a sequência de instruções de modelagem para se criar um modelo geométrico.

da “caixa alvo” em cada um dos módulos da malha da superfície de referência (estágio c.2 da fase C da etapa 3), pela cor laranja. Por fim, a execução das “transformações contínuas” entre a “caixa fonte” e a “caixas alvo” (estágio c.3 da fase C da etapa 3) está identificada pela cor amarelo. Deve-se destacar que a etapa 1 e a fase B da etapa 3 não estão contidos nessa *definition*, visto que não foram modeladas no GH, mas sim no Rhinoceros.

Figura 193 – *Definition* correspondente ao modelo geométrico final do estádio



Fonte: interface do GH com programação da autora.

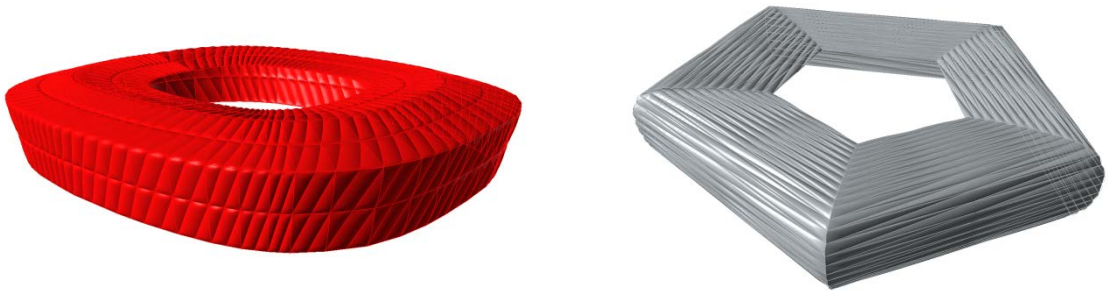
5.2.6 Variações paramétricas

O processo de modelagem foi realizado de modo a possuir parâmetros de modelagem que ao alterarem seus valores, possibilitam a exploração de outras soluções formais, ou seja, as variações paramétricas. Destacam-se dois parâmetros de modelagem: o número de geratrizes da malha modeladora nas direções “*u*” e “*v*” (1), e a forma do elemento padrão de fechamento (2). Para demonstrar tal situação foram produzidas algumas variações de cada um dos parâmetros.

Para o primeiro parâmetro (1) foram usados os valores de duas geratrizes na direção “*u*”, e cinquenta na “*v*”, conforme a Figura 194 (a) e cinco geratrizes na direção “*u*”, e dez na “*v*”, como visto na Figura 194 (b).

Figura 194 – Variações do número de geratrizes da malha modeladora nas direções "*u*" e "*v*"

(a) (b)

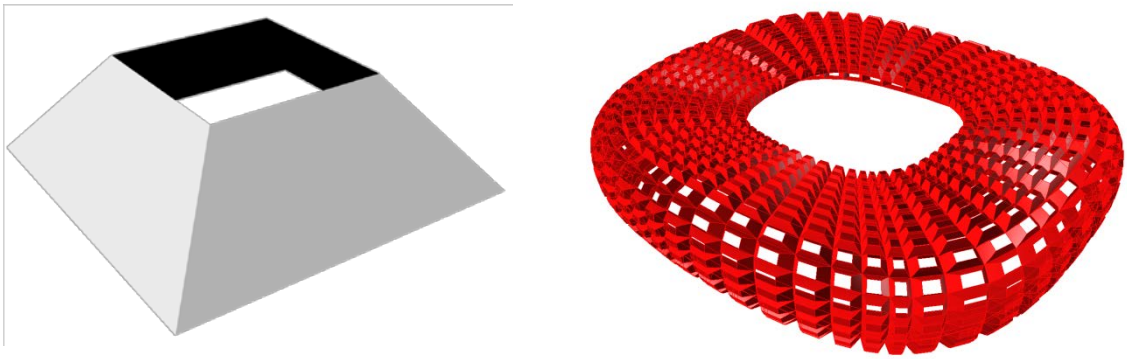


Fonte: própria autora.

Para o segundo parâmetro (2) foram usadas duas formas diferentes, vistos nas Figuras 195 (a) e 196 (a), para os elementos padrão de fechamento, que resultaram em duas superfícies diferentes, conforme as Figuras 195 (b) e 196 (b).

Figura 195 – Variações na forma elemento padrão de fechamento: (a) elemento padrão; (b) resultado do *morphing*

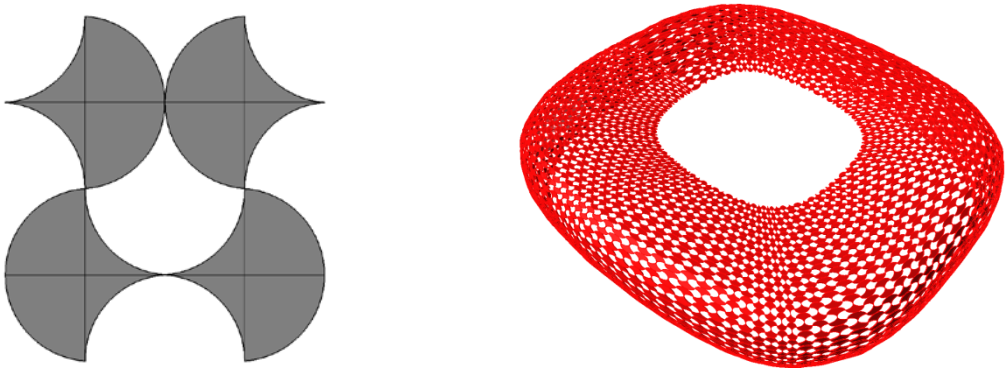
(a) (b)



Fonte: própria autora.

Figura 196 – Variações na forma elemento padrão de fechamento: (a) elemento padrão; (b) resultado do *morphing*

(a) (b)



Fonte: própria autora.

Após realizar essas variações paramétricas do modelo, notam-se mudanças significativas quando se altera um dos parâmetros. No primeiro exemplo, percebeu-se que a diminuição da quantidade de geratrizes nas direções "*u*" e "*v*", resulta no formato primário da superfície

externa cada vez menos curva. Enquanto que, no segundo exemplo, a troca do elemento padrão por outro diferente, resultou na modificação das características visuais do modelo, similar a modificação de ma textura, ao mesmo tempo em que mantém o formato primário da superfície externa do estádio.

5.3 Estudo Empírico 2: HSB Turning Torso

No Estudo 2 foi modelado o edifício de uso misto HSB Turning Torso (Figura 197), localizado em Malmö na Suécia, e foi projetado pelo arquiteto Santiago Calatrava em 1999. A descrição dessa obra foi realizada no item 4.2.18.

Figura 197 – Fachada do HSB Turning Torso

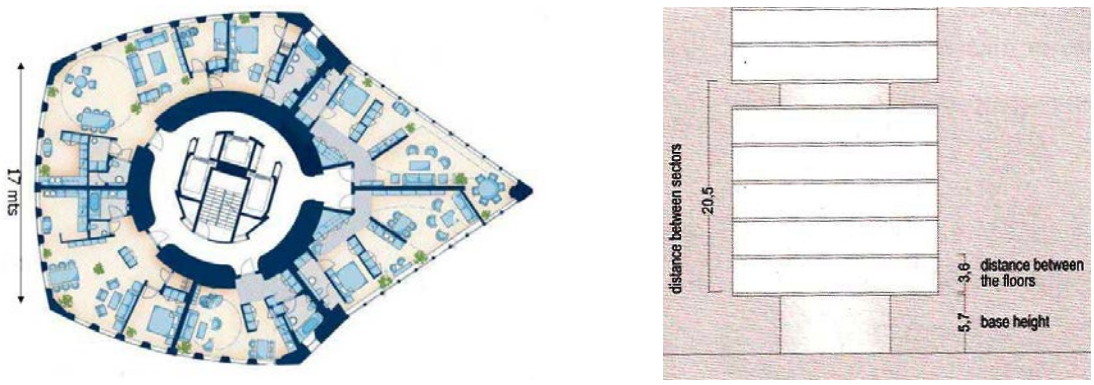
Fonte: KONE CORPORATION, 2006, p. 9.

5.3.1 Levantamento de informações

Inicialmente, foi realizado o levantamento das informações sobre o *HSB Turning Torso*, no qual foram coletadas várias fotografias, plantas e cortes, das quais pode-se destacar a planta do pavimento tipo (Figura 198a) e um desenho esquemático do corte (Figura 198b), que continha as informações principais sobre as dimensões da edificação. Este desenho do corte foi extraído do livro *Parametric Architecture with Grasshopper* (TEDESCHI, 2011).

Figura 198 – (a) Planta do pavimento tipo com ambientação; (b) corte esquemático

(a) (b)



Fonte: (a) KONE CORPORATION, 2006, p. 12; (b) TEDESCHI, 2011, p. 117.

5.3.2 Principais etapas da modelagem

A modelagem desta edificação usou como referência inicial um estudo similar contido no livro *Parametric Architecture with Grasshopper* de Arturo Tedeschi (2011). O processo não foi seguido literalmente, na medida em que foram feitas alterações e acréscimos a ele.

De forma similar ao Estudo 1, o desenvolvimento foi estruturado segundo a hierarquia de três níveis: etapas dividas em fases, que por sua vez são subdividas em estágios. Essa estrutura se desenvolve, para o Estudo 1, em cinco etapas e seus sub-níveis, como exposto a seguir:

Etapa 1: Preparo da imagem do pavimento tipo (gabarito)

Etapa 2: Modelagem da superfície externa do núcleo de concreto

Etapa 3: Modelagem da superfície externa dos blocos de pavimentos da edificação

a) Modelagem das superfícies de referência dos blocos

a.1) Desenho do perímetro do pavimento tipo sobre a imagem

a.2) Cópias do perímetro relativas ao primeiro bloco

a.3) Cópias do perímetro relativas aos demais blocos

a.4) Rotação do contorno dos pavimentos

a.5) Geração das superfícies laterais a partir dos contornos dos pavimentos (*loft*)

b) Geração das lajes por extrusão

Etapa 4: Modulação da fachada da edificação com os elementos de fechamento

a) Seleção de uma das sete faces que compõe a superfície externa de referência

b) Definição da malha sobre a superfície selecionada

c) Construção do elemento padrão de fechamento por extrusão

d) Ajuste da superfície final da edificação por *morphing*

d.1) Inserção do elemento padrão de fechamento na “caixa fonte”

d.2) Inserção da “caixa alvo” em cada um dos módulos da malha da superfície selecionada

d.3) Execução das “transformações contínuas” entre “caixa fonte” e “caixas alvo”

Etapa 5: Modelagem da superfície da “treliça” metálica

a) Modelagem do tirante

a.1) Construção da diretriz

a.2) Correções de afastamento e da origem da curva diretriz

a.3) construção da geratriz

a.4) Geração da superfície do tirante por varredura

b) Modelagem das barras de ancoragem do bloco de pavimentos

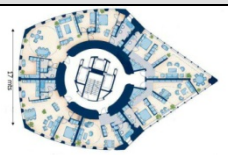
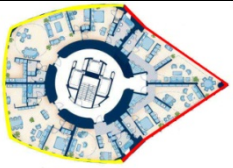
b.1) Construção da diretriz

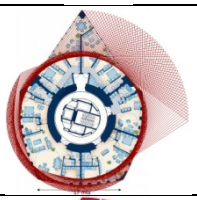
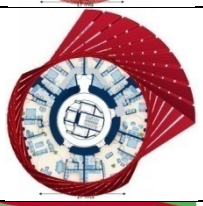
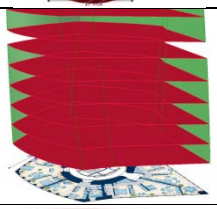
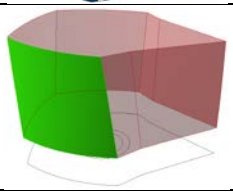
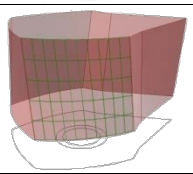
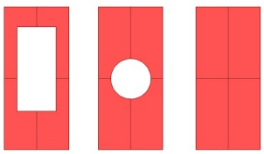
b.2) Construção da geratriz

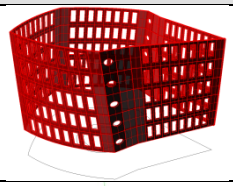
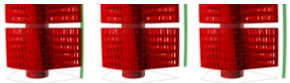
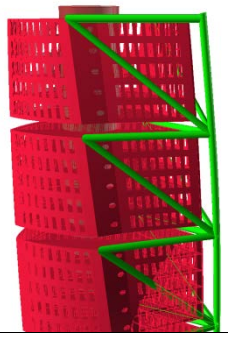
b.3) Geração da superfície das barras por varredura

A síntese deste processo está contida no Quadro 12.

Quadro 12 – Quadro síntese do processo de modelagem do Turning Torso

ETAPA	FASE	ESTÁGIO	SOFTWARE	IMAGEM
(1) Preparo da imagem do pavimento tipo (gabarito)			Rhinoceros	
(2) Modelagem da superfície externa do núcleo de concreto			Grasshopper	
(3) Modelagem da superfície externa dos blocos de pavimentos da edificação	(A) Modelagem das superfícies de referência dos blocos	(a.1) Desenho do perímetro do pavimento tipo sobre a imagem	Rhinoceros	

ETAPA	FASE	ESTÁGIO	SOFTWARE	IMAGEM
(3) Modelagem da superfície externa dos blocos de pavimentos da edificação	(A) Modelagem das superfícies de referência dos blocos	(a.2) Cópias do perímetro relativo ao primeiro bloco	Grasshopper	
		(a.3) Rotação do contorno dos pavimentos	Grasshopper	
		(a.4) Rotação de todas as linhas perimetrais	Grasshopper	
(3) Modelagem da superfície externa dos blocos de pavimentos da edificação	(A) Modelagem das superfícies de referência dos blocos	(a.5) Geração das superfícies laterais a partir dos contornos dos pavimentos (*loft*)	Grasshopper	
	(B) Geração das lajes por extrusão		Grasshopper	
(4) Modulação da fachada da edificação com os elementos de fechamento	(A) Seleção de uma das sete faces que compõe a superfície externa de referência		Grasshopper	
	(B) Definição da malha sobre a superfície selecionada		Grasshopper	
	(C) Construção do elemento padrão de fechamento por extrusão		Rhinoceros	
	(D) Ajuste da superfície final da edificação por *morphing*	(d.1) Inserção do elemento padrão de fechamento na “caixa fonte”	Grasshopper	
		d.2) Inserção da “caixa alvo” em cada um dos módulos da malha da superfície selecionada	Grasshopper	

ETAPA	FASE	ESTÁGIO	SOFTWARE	IMAGEM
(4) Modulação da fachada da edificação com os elementos de fechamento	(D) Ajuste da superfície final da edificação por *morphing*	(d.3) Execução das "transformações contínuas" entre "caixa fonte" e "caixas alvo"	Grasshopper	
(5) Modelagem da superfície da treliça metálica	(A) Modelagem do elemento vertical	(a.1) Construção da curva diretriz	Grasshopper	
		(a.2) Correções de posicionamento e da origem da curva diretriz	Grasshopper	
		(a.3) Construção da geratriz	Grasshopper	
		(a.4) Geração da superfície do elemento vertical por varredura	Grasshopper	
(5) Modelagem da superfície da treliça metálica	(B) Modelagem das barras de ancoragem do bloco de pavimentos	(b.1) Construção da diretriz	Grasshopper	
		(b.2) Construção da geratriz	Grasshopper	
		(b.3) Geração da superfície das barras por varredura	Grasshopper	

Fonte: própria autora

5.3.3 Descrição da construção do modelo

No presente item, detalha-se a modelagem com imagens representativas dos passos mais significativos.

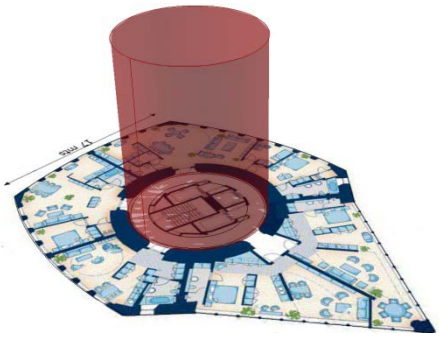
5.3.3.1 Etapa 1: Preparo da imagem do pavimento tipo (gabarito)

Nessa etapa foi executado um gabarito para auxiliar a modelagem da forma geral do edifício, baseado na planta do pavimento tipo do mesmo. Esta imagem foi importada, escalada e disposta, por conveniência do trabalho, com o centro na origem do sistema de coordenadas no ambiente de modelagem do Rhinoceros.

5.3.3.2 Etapa 2: Modelagem da superfície externa do núcleo de concreto

Nessa etapa, se construiu a representação do núcleo de concreto (Figura 199) usando-se a primitiva geométrica “cilindro”, correspondente à forma do núcleo. Nesse processo, o cilindro foi construído com raio de 5,60 m e altura de 195 m, cujo centro coincidiu com o centro da planta do pavimento tipo.

Figura 199 – Detalhe do posicionamento do cilindro na planta do “pavimento tipo”



Fonte adaptada pela própria autora.

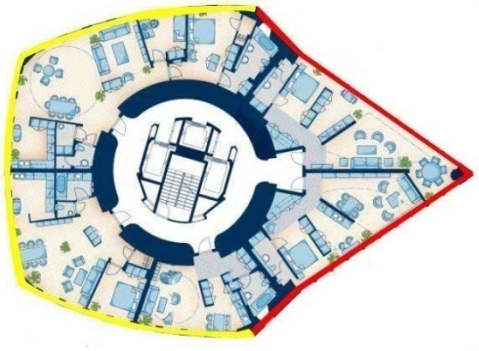
5.3.3.3 Etapa 3: Modelagem da superfície externa dos blocos de pavimentos da edificação

Nessa etapa foi gerada a superfície que foi empregada como referência para a execução da Etapa 4. Esse procedimento utilizou-se em parte, a modelagem por seções transversais (*loft*) e na outra parte, a modelagem por extrusão. Por isso, foi divido em duas fases: modelagem das superfícies de referência dos blocos (A) e geração das lajes por extrusão (B).

Na fase A, foi usada a modelagem por seções transversais (*loft*), que como visto no item 3.2.2.1.3, para ser executada possui como pré-requisitos, uma série de linhas planas (seções) que são interpoladas para criar uma superfície. Esse procedimento foi divido em cinco estágios: desenho do perímetro do pavimento tipo sobre a imagem (a.1), cópias do perímetro relativas ao primeiro bloco (a.2), cópias do perímetro relativas aos demais blocos (a.3), rotação do contorno dos pavimentos (a.4) e, finalmente, geração das superfícies laterais a partir dos contornos dos pavimentos (a.5).

No primeiro estágio (a.1) foi desenhado o contorno do pavimento tipo, no Rhinoceros, para ser usado como seção transversal do *loft*. Esse contorno foi constituído por três arcos (em amarelo) e quatro segmentos de retas (em vermelho), vistos na Figura 200. A importância da utilização dessas sete linhas é explicada adiante.

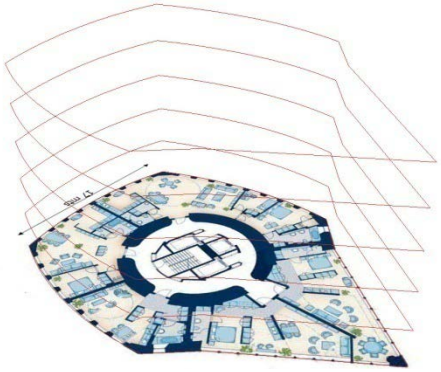
Figura 200 – Contorno do pavimento tipo: trechos curvos, em amarelo, e trechos retos, em vermelho



Fonte adaptada pela própria autora.

No segundo estágio (a.2), foi copiado o contorno dos pavimentos relativos ao primeiro bloco nas elevações correspondentes aos mesmos. No GH é possível realizar múltiplas cópias simultaneamente, uma vez que se pode parametrizar os valores dos números de cópias e a distância entre elas, ao tornar esses valores em dados de entrada (*input*) implícitos. Para este caso, foram realizadas seis cópias distanciadas em 3,60 m uma das outras (Figura 201). O conjunto das seis cópias corresponde ao primeiro bloco.

Figura 201 – Conjunto dos seis perímetros, depois de serem copiados na direção vertical

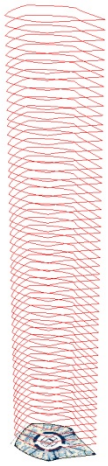


Fonte: própria autora.

No terceiro estágio (a.3), foram realizadas cópias do conjunto de linhas criadas no estágio a.2, na direção vertical, que correspondem aos oito blocos restantes para completar a forma do edifício. Foi utilizado o mesmo processo de parametrização que no estágio a.2, copiando-se simultaneamente as oito cópias do conjunto de linhas com distância de piso à piso entre blocos de 20,50 m (ver Figura 198b) e resultando em cinquenta e quatro perímetros (Figura 202). Deve-se destacar que a execução das cópias foi condicionada ao resultado do estágio a.2

por uma *constraint* de hierarquia[152], de modo que se for alterado o resultado do estágio a.2, também se alteraria o estágio a.3.

Figura 202 – Resultado do estágio a.3: contorno de todos os pavimentos



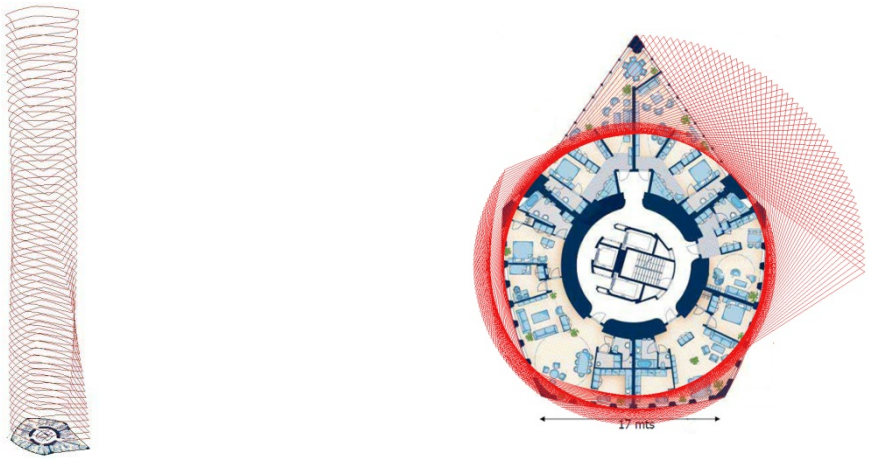
Fonte: própria autora.

No quarto estágio (a.4), foi realizada uma rotação progressiva de cada pavimento para criar a aparência de torção do edifício. De acordo com o levantamento, essa torção é produzida ao se rotacionar todos os pavimentos, resultando em um ângulo de 90° entre o primeiro e o último pavimento. Foi utilizado o mesmo processo de parametrização que no estágio a.2 e a.3, onde tem-se como os dados de entrada (*input*), o ângulo de rotação entre dois pavimentos consecutivos e o número que determina a quantidade de linhas a serem rotacionadas. Neste caso, foi aplicado 0,03[153] radianos (unidade padrão do GH) entre uma linha e a seguinte, repetindo essa operação continuamente até a última. No resultado (Figura 203), pode-se perceber a forma geral do edifício por meio de um modelo simplificado em estrutura de arame (*wireframe*) contendo os 54 pavimentos rotacionados.

[152] Ver item 2.2.2.4, que trata de novos tipos de *constraint*.
[153] Resultado da divisão do ângulo total de 1,57 rad, correspondente à 90°, por 54 que corresponde o número total de linhas perimetrais.

Figura 203 – Os 54 pavimentos rotacionados: (a) em perspectiva; (b) em planta baixa

(a) (b)



Fonte: própria autora.

No quinto estágio (a.5), foi gerada a superfície lateral de cada bloco ao se aplicar a modelagem por seções transversais (*loft*) a cada seis[154] perímetros, para se criar uma superfície específica (Figura 200a) para cada um dos nove blocos. Para guiar a execução dessa operação, usou-se uma *constraint* semântica de controle de dados para indicar cada um dos grupos de seis pavimentos, correspondente a um bloco. O resultado pode ser visto na Figura 204 (b) e (c).

Figura 204 – (a) Superfície criada pelo *loft* dos seis primeiros pavimentos; Superfícies laterais de todos os blocos criadas pelo *loft:* (b) em perspectiva; (c) em planta baixa

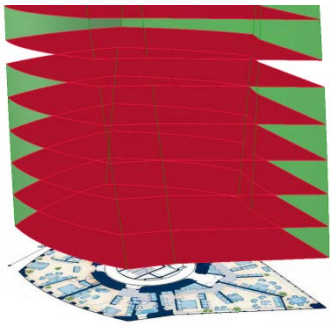
(a) (b) (c)

Fonte: própria autora.

Na fase B, foram geradas as superfícies para representar as lajes do edifício (Figura 205) ao se aplicar a modelagem por extrusão em todos os perímetros, onde a altura da extrusão de 30 centímetros, corresponde a espessura da laje.

[154] Caso fosse utilizada a modelagem por seções transversais em todas as 54 linhas, resultaria uma superfície única para todo o edifício.

Figura 205 – Visualização das lajes dos pavimentos em vermelho e superfície externa do bloco em verde translúcido



Fonte: própria autora.

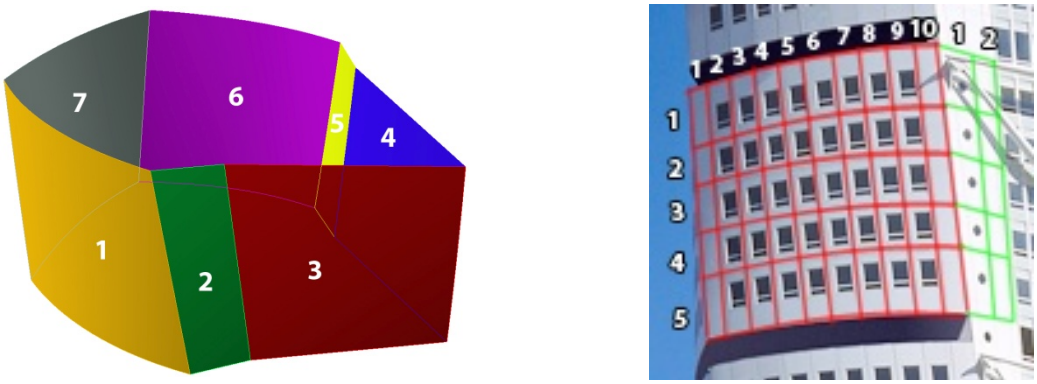
Nesse ponto, as superfícies geradas (Figura 200) se assemelham ao formato primário dos blocos de andares do edifício, uma vez que devem funcionar como referência para modelagem da modulação da fachada da edificação com os elementos de fechamento e abertura (em maiores detalhes no item a seguir), para aproximar ainda mais o modelo geométrico do objeto real.

5.3.3.4 Etapa 4: Modulação da fachada da edificação com os elementos de fechamento

A fachada da edificação é formada pela superfície lateral externa de cada bloco de pavimentos, a qual possui sete faces[155] de três tipos distintos. Apesar dessas diferenças, todas as faces foram moduladas, sendo que nas faces maiores (faces 1, 3, 4, 6 e 7 na Figura 206a) a disposição dos módulos segue uma matriz de dez colunas por cinco linhas e nas faces menores (faces 2 e 5 na Figura 206a) uma matriz de duas colunas por cinco linhas. Essa disposição em matriz pode ser vista na Figura 202 (b).

Figura 206 – (a) representação esquemática das sete faces da superfície lateral externa do bloco de pavimentos; (b) sobreposição da malha na fachada da edificação, indicando a disposição em matriz

(a) (b)



Fonte: própria autora.

[155] Cada face corresponde a um dos segmentos de reta ou curva que compõe o perímetro do pavimento, que foi gerado no item 5.3.3.3.

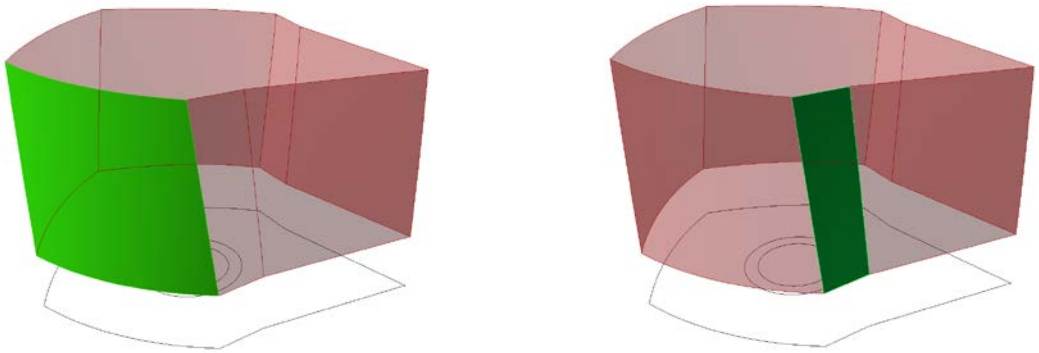
Desse modo pode-se afirmar que existem dois modelos de disposição dos módulos na fachada da edificação, sendo que os mesmos repetem-se tanto em cada bloco quanto em toda a edificação. Por questão de conveniência de trabalho, cada modelo recebeu uma designação: matriz 1 para a face maior e matriz 2 para a face menor. Toda a descrição do processo de definição da modulação foi apresentada usando-se esses dois modelos como exemplo.

Na presente etapa, foi definida a modulação da superfície referência dos blocos dos pavimentos, para construir o fechamento lateral do edifício. Esse processo foi executado em quatro fases: seleção de uma das sete faces que compõe a superfície externa de referência (A), definição da malha sobre a superfície selecionada (B), construção do elemento padrão de fechamento por extrusão (C) e ajuste da superfície final da edificação por *morphing* (D).

Na fase A, selecionou-se a face para se construir a malha sobre ela. Na Figura 207 (em verde), mostram-se dois exemplos, uma para a face maior e outro para a menor.

Figura 207 – Seleção da face: (a) face maior; (b) face menor

(a) (b)



Fonte: própria autora.

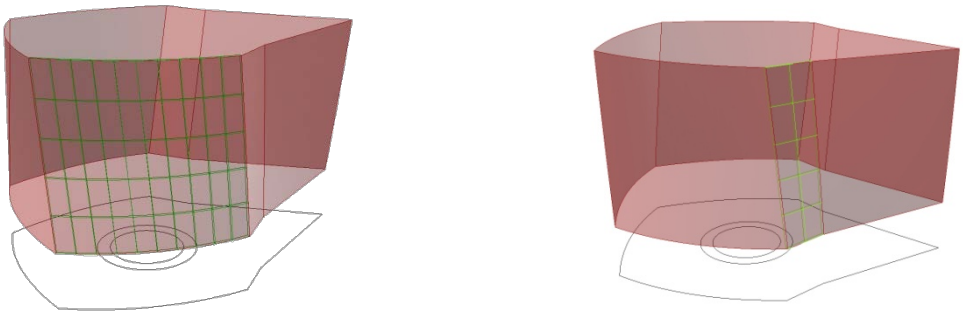
Na fase B, a malha foi definida de maneira semelhante ao processo de definição de superfície de forma livre e seus retalhos. Como visto no item 3.2.1.2, essas superfícies são definidas por equações (paramétricas) de dois parâmetros, padronizados "*u*" e "*v*". Do mesmo modo, no GH, a malha foi determinada ao se dispor geratrizes seguindo as direções *u* e *v* da superfície da face selecionada, o que determinou o módulo a partir do qual foram realizadas as operações da fase seguinte. Destaca-se, que o número de geratrizes a serem utilizadas foi parametrizado[156], ao tornar o número de geratrizes nas direções "*u*" e "*v*" em dados de entrada (*input*) implícitos da definição da malha.

[156] Esse valor pode ser modificado pelo usuário a qualquer momento e as alterações correspondentes serão automaticamente ajustadas pela ferramenta de modelagem paramétrica, neste caso, o Grasshopper. Maiores detalhes sobre parametrização no item 2.2.2.2.

Neste caso, a direção "*u*" representa as colunas da matriz e a direção "*v*" as linhas. Por isso, na face maior foi definida a matriz 1 com cinco geratrizes na direção "*u*" e dez na direção "*v*" (em verde na Figura 208a), enquanto para a face menor foi definida a matriz 2 com cinco geratrizes na direção "*u*" e duas na direção "*v*" (em verde na Figura 208b).

Figura 208 – Modelo geométrico da definição da malha sobre face selecionada, em verde: (a) matriz 1; (b) matriz 2

(a) (b)



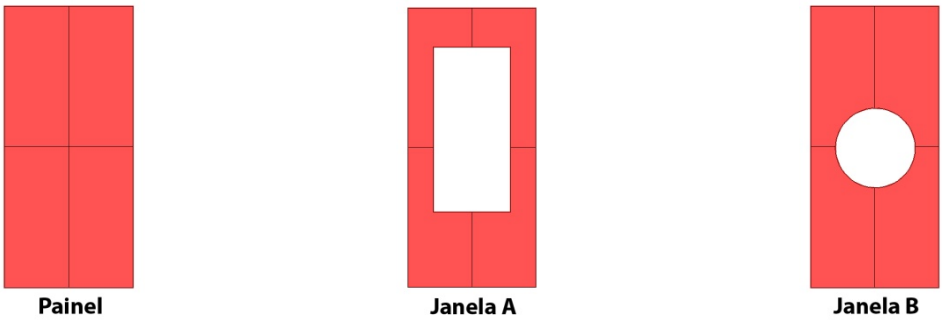
Fonte: própria autora.

Na fase C, construíram-se os elementos padrão de fechamento, o qual é composto a partir de painéis pré-fabricados, em três modelos distintos: um cego, um com abertura retangular e um com abertura circular. Por questão de conveniência de trabalho, cada um recebeu uma designação, como visto na Figura 209.

Esses painéis foram modelados no Rhinoceros, desenhando-se o contorno de sua forma, sobre a qual foi aplicada a modelagem por extrusão, onde a altura da extrusão de 15 centímetros, que corresponde à espessura do painel.

Figura 209 – Os três modelos de painéis pré-fabricados de fechamento da fachada da edificação

(a) (b) (c)



Fonte: própria autora.

Na Fase D, foi realizado o ajuste da superfície final da edificação por *morphing*, como visto no item 5.2.3.3 do Estudo 1. Esse procedimento foi executado em três estágios. Primeiro, no estágio (d.1), inseriu-se o elemento padrão de fechamento na "caixa fonte", a qual mapeou as características formais desse elemento. No Segundo estágio (d.2), inseriu-se uma "caixa alvo"

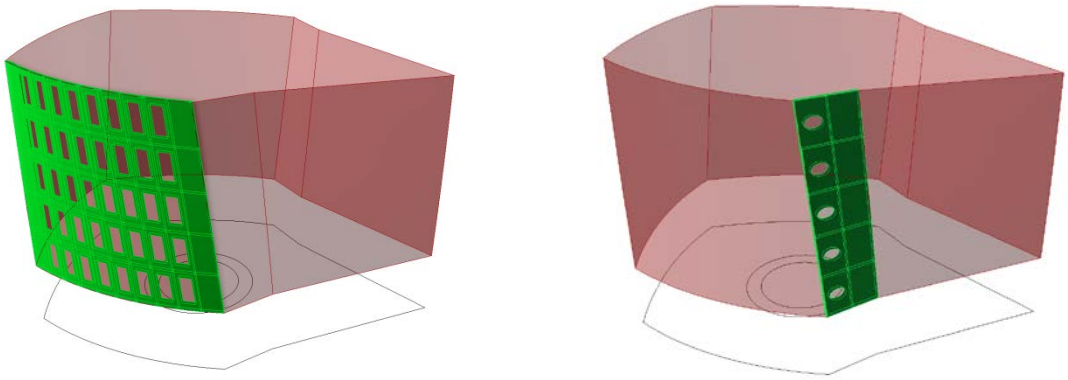
em cada um dos módulos da malha da superfície de referência, sendo que essa relação foi determinada como uma *constraint* de hierarquia, de modo que ao se modificar o número de módulos da malha, o número de “caixas alvo” será automaticamente alterado pelo GH.

No terceiro e último estágio (d.3), executou-se as “transformações contínuas” entre “caixa fonte” e “caixas alvo”, ou seja, o elemento padrão de fechamento foi ajustado automaticamente a modulação da superfície. Porém, neste Estudo 2 existem três elementos padrão que estão dispostos na malha em uma ordem específica, diferentemente do Estudo 1, no qual um único elemento padrão foi repetido continuamente ao longo da superfície de referência.

Para que se mantenha a configuração de aberturas do Turning Torso, foi necessário condicionar a execução do *morphing* com uma *constraint* semântica de controle de dados. Essa *constraint* indicou que para a matriz 1, o **painel** deveria ser inserido nas “caixas fontes” das colunas um e dez (Figura 206b), enquanto a **janela A** deveria ser inserida nas “caixas fontes” das colunas restantes. Para a matriz 2, o **painel** deveria ser inserido nas “caixas fontes” das colunas dois e a **janela B** na coluna um. O resultado por ser visto na Figura 210.

Figura 210 – Resultado da aplicação do *morphing*, em verde: (a) matriz 1; (b) matriz 2

(a) (b)

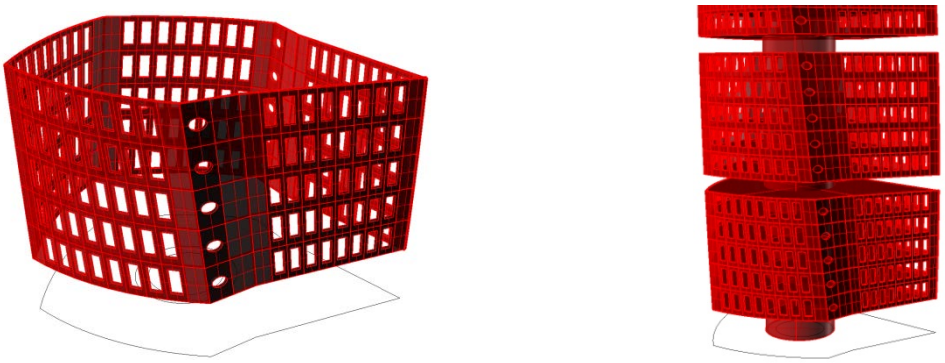


Fonte: própria autora

Como comentado no começo do presente item, o procedimento de modulação da superfície externa dos blocos descrito aqui, foi repetido não só para as outras faces do mesmo bloco (Figura 211a), como também para os demais blocos (Figura 211b).

Figura 211 – Repetição do procedimento de modulação: (a) nas outras faces do bloco; (b) demais blocos

(a) (b)



Fonte: própria autora.

5.3.3.5 Etapa 5: Modelagem da superfície da treliça metálica

Na quinta etapa, foi modelada a superfície da "treliça" metálica da edificação por varredura (*sweep*), tanto no tirante vertical quanto nas barras de ancoragem que ligam o tirante com o edifício. Esse processo foi dividido em duas fases: modelagem do tirante (A) e modelagem das barras de ancoragem dos blocos de pavimentos (B).

Na fase A, a construção do tirante foi descrita em quatro estágios: construção da diretriz (a.1), correções de afastamento e da origem da curva diretriz (a.2), construção da geratriz (a.3) e geração da superfície do elemento vertical por varredura (a.4).

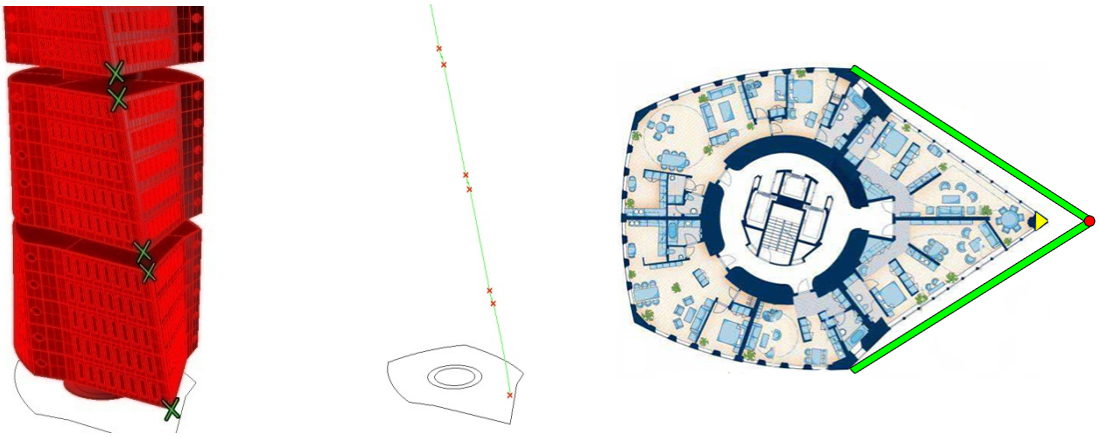
No primeiro estágio (a.1), foi construída a curva diretriz que representa o eixo do tirante e foi definida, de acordo com dados levantados, como uma curva espacial (hélice) que descreve o trajeto percorrido da base ao topo dos blocos, pelo ponto (em vermelho na Figura 212c) posicionado a frente do vértice (em amarelo na Figura 212c) do perímetro, gerado pela junção dos dois lados que formam o menor ângulo interno.

Para construir essa hélice, foram usados como referência dois pontos em cada bloco, como visto na Figura 212 (a), num total de dezoito pontos, através dos quais a curva obrigatoriamente passou sobre (Figura 212b), de maneira similar a interpolação descrita no item 3.2.1.1. Deve-se apontar que essa relação de referência foi determinada como uma *constraint* de hierarquia[157], de modo que se fosse alterada a posição desse ponto, a forma da curva também se alteraria.

[157] Ver item 2.2.2.4, que trata de novos tipos de *constraint*.

Figura 212 – (a) Em verde: pontos de referência; (b) curva (em verde) passando através dos pontos (em vermelho); (c) esquema ilustrativo dos elementos da treliça em relação a planta pavimento tipo

(a) (b) (c)

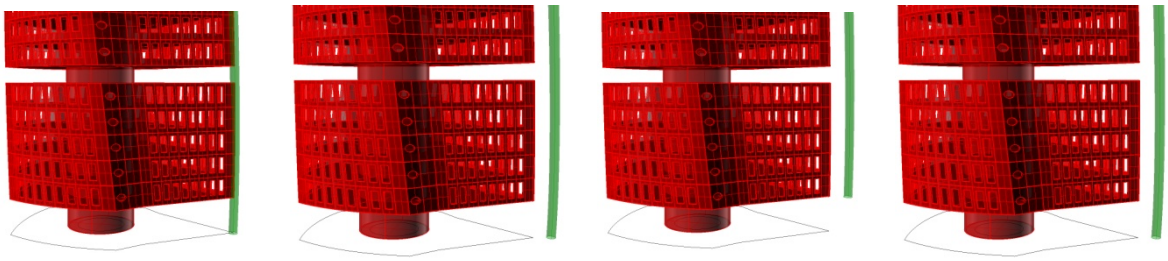


Fonte: própria autora.

No segundo estágio (a.2), foram executadas correções de afastametno e da origem da curva diretriz, pois, nesse momento a curva se encontra encostada na superfície externa dos blocos (Figura 213a) e possui comprimento correspondente ao intervalo entre base e o topo da sequência de blocos (Figura 213c). Ambas as características são incompatíveis com a descrição do objeto real. Assim, por um lado, a curva foi afastada uniformemente à uma distância de 2,80 metros, mantendo sua direção e sentido, para corrigir o afastamento (Figura 213b). Por outro lado, essa curva teve seu comprimento estendido em 5,70 metros na direção vertical e no sentido descendente, para corrigir a origem da curva, que deveria se iniciar no chão (Figura 213d).

Figura 213 – Em verde, correção de afastamento e origem: (a) encostado a edificação; (b) afastado uniformemente da edificação; Em verde, correção de origem: (c) tirante termina na altura que o bloco está do solo; (d) tirante em contato com o solo

(a) (b) (c) (d)



Fonte: própria autora.

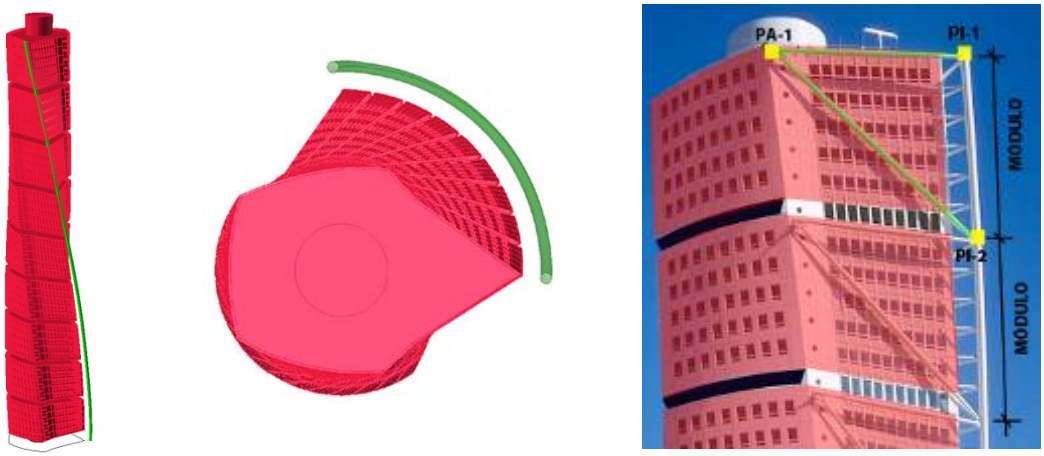
No terceiro estágio (a.3), foi construída a geratriz, um círculo de raio 0,70 m, cujo centro está posicionado na base da hélice produzida no estágio a.2. Deve-se destacar que essa relação foi

determinada como uma *constraint* de hierarquia[158], de modo que se alterasse a hélice, a posição do círculo também se alteraria.

No quarto estágio (a.4), foi gerada a superfície cilindróide do tirante por varredura, quando se usou como diretriz a hélice produzida no estágio a.2 e como geratriz o círculo gerado no estágio a.1. O resultado por ser visto na Figura 214 (a) e (b).

Figura 214 – Em verde, superfície cilindróide do tirante: (a) em perspectiva; (b) em planta; (c) módulo de criação das barras

(a) (b) (c)



Fonte: própria autora.

Na fase B, foi gerada as barras (em verde na Figura 214c) que ligam o tirante à edificação. Essas barras são construídas em uma determinada ordem, definindo por um módulo estrutural, formando uma "treliça" (Figura 214c), que se repete em cada bloco.

Por questões de organização, foram definidas algumas designações aos elementos. Esse módulo é composto por dois pares de barras, chamados aqui de superior e inferior. O par superior está nivelado com o topo do bloco no qual ancora, enquanto o par inferior está na diagonal dele[159]. Para cada barra foi considerado como ponto inicial, o ponto de conexão com o tirante (PI-1 e PI-2, em amarelo na Figura 214c) e como ponto final, os pontos de ancoragem nos blocos (PA-1, em amarelo na Figura 214c). Esses pontos foram usados como referência para gerar as diretrizes e para posicionar as geratrizes das barras.

A modelagem do módulo foi executada em três estágios: construção da diretriz (b.1), construção da geratriz (b.2) e geração da superfície das barras por varredura (b.3). No primeiro estágio (b.1), a diretriz do par superior de barras foi gerada como uma linha entre o ponto PI-1 e PA-1. E para o par inferior foi gerada como uma linha entre o ponto PI-2 e PA-1.

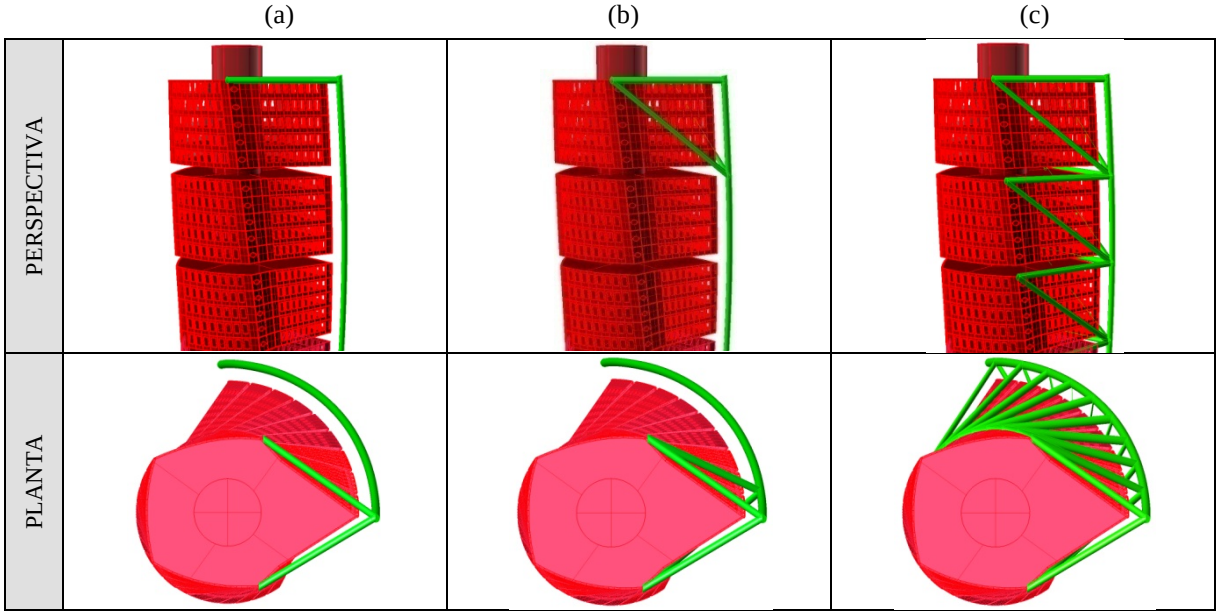
[158] Ver item 2.2.2.4, que trata de novos tipos de *constraint*.
[159] Lembrando que uma das barras em cada par está oculta na Figura 214c.

Sendo que a definição desses pontos foi determinada como uma *constraint* de hierarquia[160], de modo que se fosse alterada a posição desses pontos, as retas também se alterariam.

No segundo estágio (b.2), as geratrizes do par superior de barras foram criadas como um círculo de raio 0,70 metros, cujo centro está posicionado no ponto inicial das barras (PI-1), mantido também por uma *constraint*, como a usada no estágio b.1. E para as geratrizes do par inferior, repetiu-se o procedimento, mas com o ponto inicial em PI-2.

No terceiro estágio (b.3), foi gerada a superfície cilíndóide das barras por varredura, sendo que as diretrizes foram as retas do estágio b.1 e as geratrizes foram os círculos do estágio b.2 (Quadro 13).

Quadro 13 – Em verde, seqüência de modelagem das barras: (a) par superior; (b) par inferior; (c) repetindo os módulos ao longo da edificação



Fonte: própria autora

Como comentado anteriormente, a modelagem das barras de ancoragem foi repetida sucessivamente para todos os blocos da edificação (Quadro 13, coluna c).

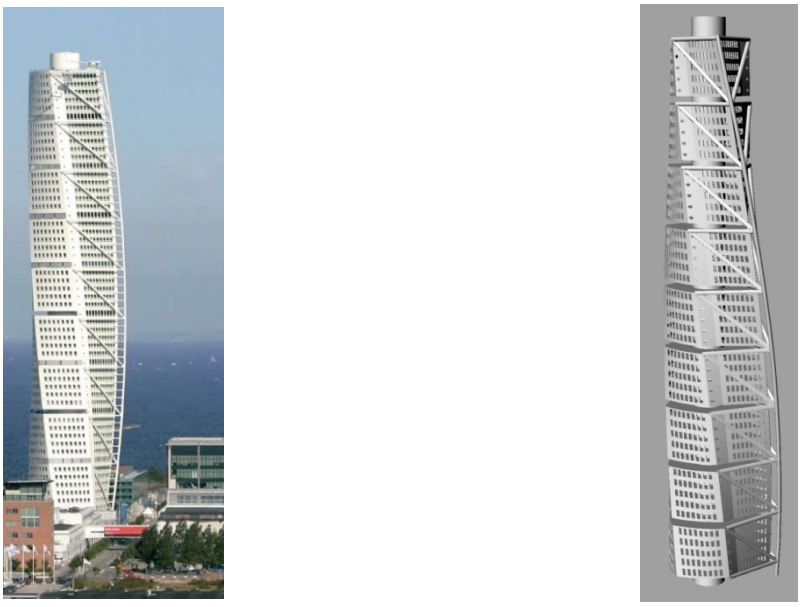
5.3.4 Apresentação do modelo final

Após a execução das etapas de modelagem descritas anteriormente, alcançou-se um modelo aproximado do *Turning Torso*. As diferenças e semelhanças entre esse modelo e a obra original podem ser vistas nas Figura 215 e Figura 216.

[160] Ver item 2.2.2.4, que trata de novos tipos de *constraint*.

Figura 215 – Turning Torso: (a) foto da edificação concluída; (b) modelo geométrico do estudo 2 criado no GH

(a) (b)



Fonte: (a) KONE CORPORATION, 2006, p. 9; (b) própria autora

Figura 216 – Turning Torso: (a) foto de detalhe; (b) modelo geométrico parcial do estudo 2 criado no GH

(a) (b)

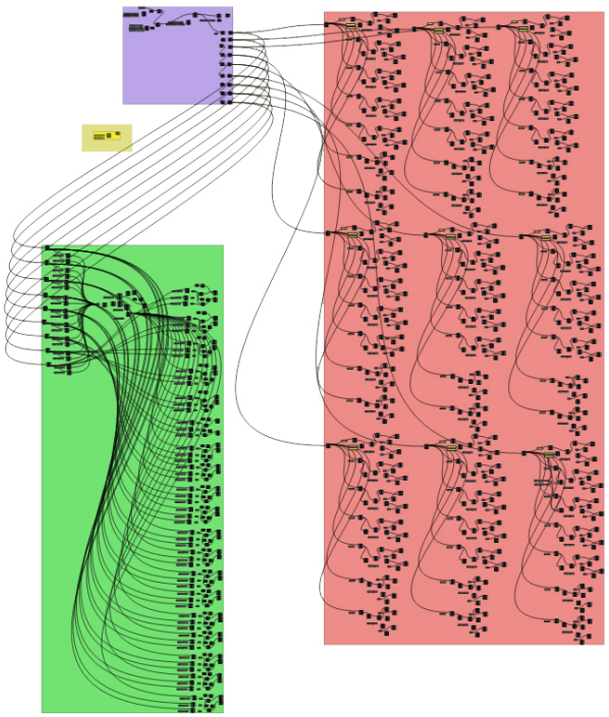
Fonte: (a) Fonte: própria autora; (b) KONE CORPORATION, 2006, p. 9.

5.2.5 Aspectos da modelagem no Grasshopper

A *definition*[161] resultante do Estudo 2 pode ser vista na Figura 217. Como essa *definition* é bem extensa, os seus componentes foram reunidos em grupos correspondentes aos quatro elementos: cilindro em amarelo (detalhado na Figura 218), bloco de andares em azul (detalhado na Figura 219), modulação da fachada com as janelas em vermelho (detalhado na Figura 220) e treliça metálica em verde (detalhado na Figura 221).

[161] Como visto no item 5.1, a *definition* representa a sequência de instruções de modelagem para a geração do modelo geométrico.

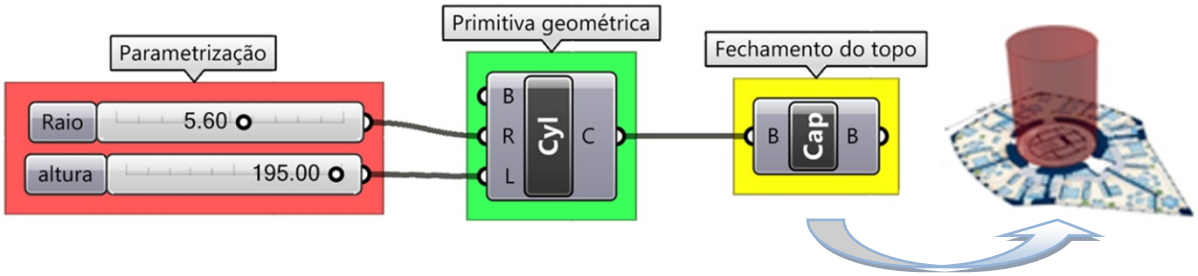
Figura 217 – *Definition* correspondente ao modelo geométrico final do Turning Torso



Fonte: interface do GH com programação da autora.

Esses grupos foram descritos em maiores detalhes a seguir, onde foram indicadas as principais etapas de modelagem, as quais foram designadas cores. Em todos esses grupos, os componentes que realizaram parametrização e *constraints* foram identificados em vermelho.

Figura 218 – *Definition* correspondente à modelagem do núcleo cilíndrico de concreto



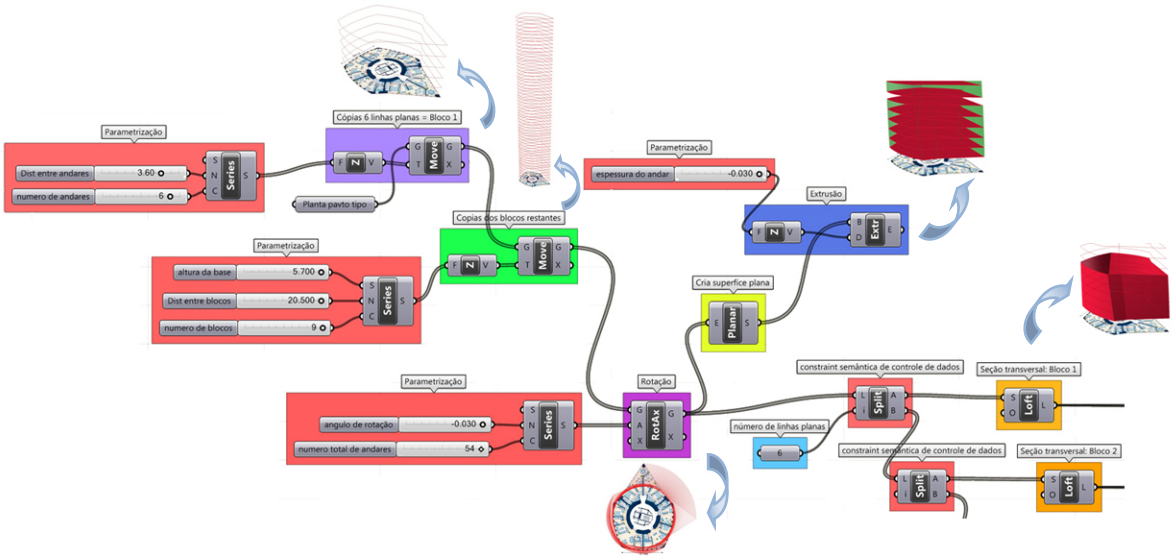
Fonte: interface do GH com programação da autora.

A Figura 218 representa a Etapa 2, modelagem da superfície externa do núcleo de concreto por, que foi divida em três componentes. Da esquerda para a direita, a parametrização dos valores de *input* (em vermelho) da primitiva geométrica “cilindro” (em verde), que no GH produz uma superfície cilíndrica, cujo fechamento do seu topo foi identificado em amarelo.

A modelagem de parte da superfície externa dos blocos de pavimentos da edificação (Etapa 3) pode ser vista na Figura 219, faltando somente alguns componentes de seção transversal

(canto inferior direito), que por serem repetitivos foram retirados da imagem, para fins de simplificação da ilustração.

Figura 219 – *Definition* correspondente a modelagem de parte da superfície externa dos blocos de pavimentos da edificação

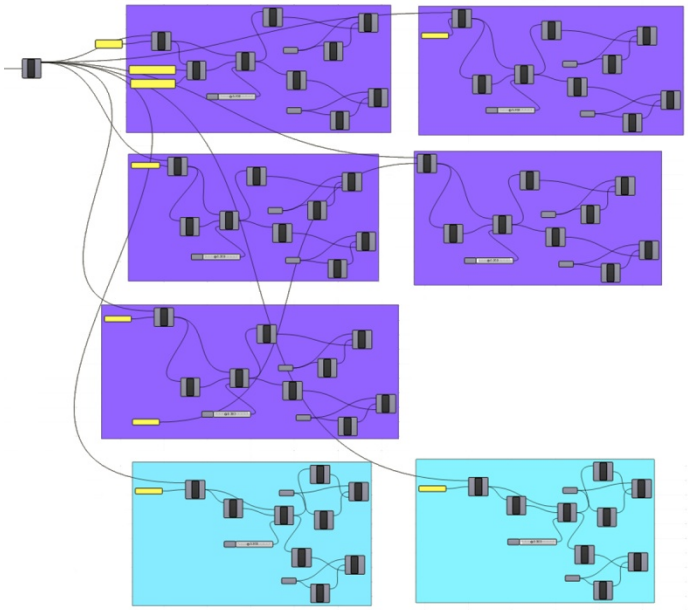


Fonte: interface do GH com programação da autora.

O componente que importou o contorno do pavimento para o GH recebeu o nome de **Planta pavto tipo.** As seis cópias do contorno dos pavimentos relativas ao primeiro bloco foi identificada pela cor lilás (estágio a.2 da fase A da etapa 3), com a correspondente parametrização dos *input* em vermelho e a esquerda. As cópias dos contornos relativos aos noves blocos foi identificada pela cor verde (estágio a.3 da fase A da etapa3), com a parametrização dos *input* em vermelho e a esquerda. A rotação de todos os contornos foi identificada pela cor roxa (estágio a.4 da fase A da etapa 3). A geração das superfícies laterais por seção transversal foi identificada pela cor laranja (estágio a.5 da fase A da etapa 3), com a *constraint*, que indica quais seis linhas receberão a ação da operação, em vermelho e a esquerda. A geração das lajes por extrusão foi identificada pela azul escuro (fase B da etapa 3), que no GH somente se aplica a uma superfície plana e não ao contorno do pavimento. Assim, a geração da superfície plana a ser extrudada foi identificada pela cor amarelo.

A modulação da fachada de um bloco com os elementos de fechamento (Etapa 4) pode ser vista na Figura 220. Como visto no item 5.3.3.4, as cinco maiores faces do bloco possuem a modulação disposta na matriz 1, por isso identificou-se cinco grupos (em azul escuro). De maneira similar, as duas faces menores foram moduladas na matriz 2, resultando em dois grupos (azul claro). Esse processo se repete para os demais blocos.

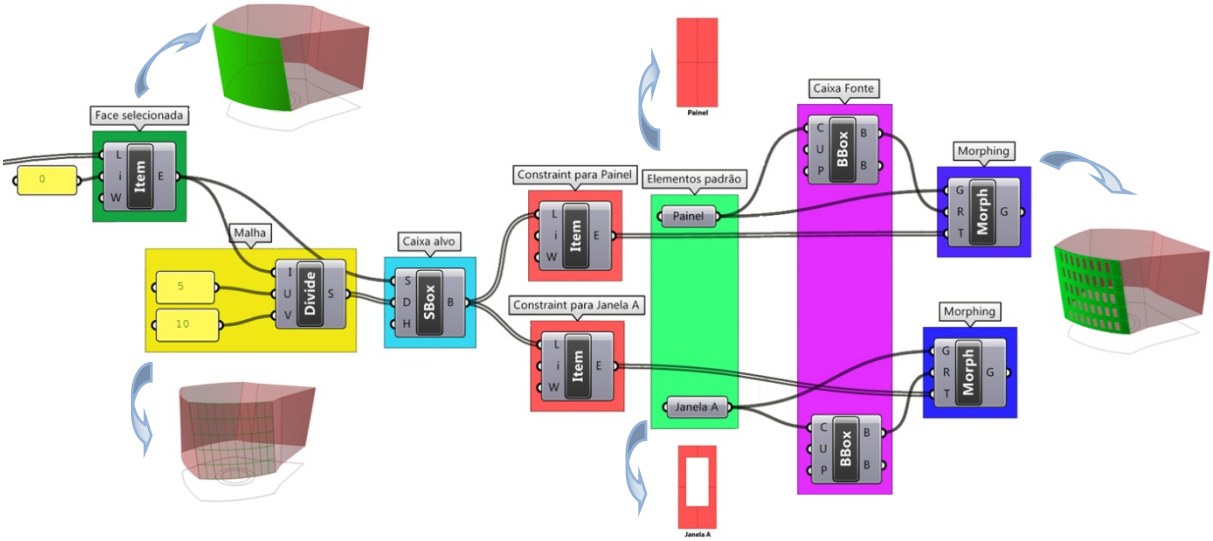
Figura 220 – *Definition* correspondente a modulação da fachada de um bloco com os elementos de fechamento



Fonte: interface do GH com programação da autora.

De forma aproximada, apresenta-se a modelagem da matriz 1 na Figura 221. A seleção de um das sete faces que compõe a superfície externa de referência foi identificada pela cor verde escuro (Fase A). A definição da malha sobre a superfície selecionada foi identificada pela cor laranja (Fase B). Os componentes que importaram os elementos padrão de fechamento foram identificados pela designação **painel** e **janela A**. A inserção dos elementos padrão de fechamento na "caixa fonte" foi identificada pela cor rosa, com um componente para cada elemento padrão (estágio d.1 da fase D da etapa 4). A inserção da "caixa alvo" em cada um dos módulos da malha da superfície selecionada foi identificada pela cor azul claro (estágio d.2 da fase D da etapa 4). A execução "transformações contínuas" entre "caixa fonte" e "caixas alvo" por *morphing* foi identificada pela cor azul escuro com um componente para cada ajuste de cada elemento padrão (estágio d.3 da fase D da etapa 4). A *constraint* que identifica em qual "caixa fonte" foi inserido o elemento de fechamento foi identificada em vermelho.

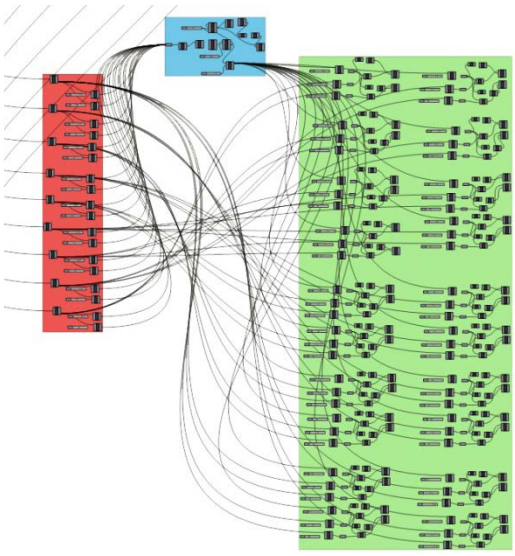
Figura 221 – *Definition* correspondente a matriz 1



Fonte: interface do GH com programação da autora.

A modelagem da superfície da treliça metálica (Etapa 5) pode ser vista na Figura 222, onde as *constraint* que fazem referência aos pontos sobre os blocos foram identificadas pela cor vermelha. A modelagem do elemento vertical foi identificada pela cor azul claro (Fase A), enquanto a modelagem das barras de ancoragem para cada bloco de pavimento (Fase B) foi identificada pela cor verde. Em uma visão aproximada, a Fase A e B serão apresentadas, a seguir.

Figura 222 – *Definition* correspondente a modelagem da superfície da treliça metálica



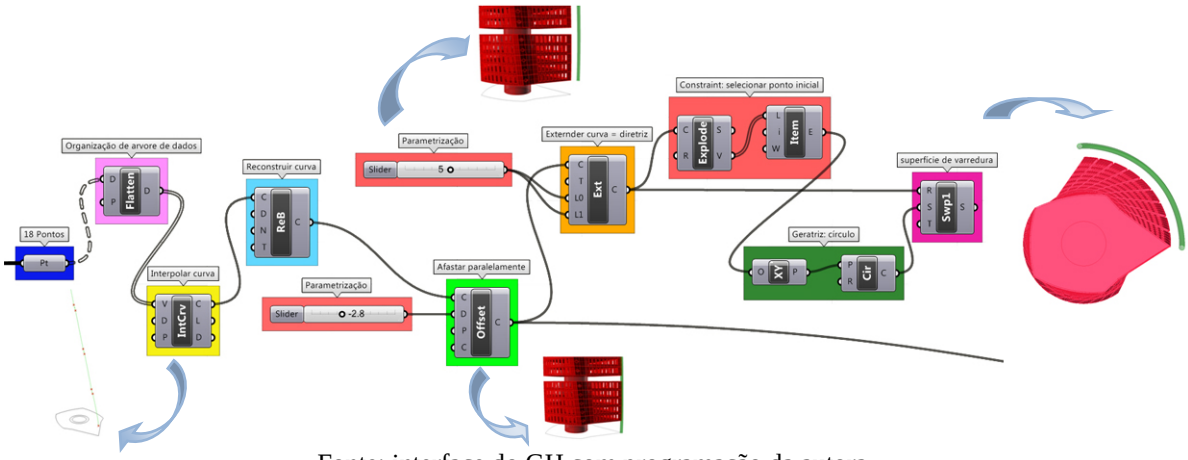
Fonte: interface do GH com programação da autora.

A modelagem do elemento vertical pode ser vista na Figura 223. O componente que representa os dezoito pontos, resultantes do *constraint*, foi identificado pela cor azul escuro. Antes, de traçar a curva sobre eles, teve-se que usar um componente de organização de árvore

de dados[162] para indicar os pontos na ordem certa, que está identificada pela cor rosa claro. A construção da curva diretriz está identificada pela cor amarelo (estágio a.1 da fase A da etapa 5). Por questões de implementação, a curva teve que ser reconstruída para ser mais suave (*smooth*), ou seja, possuir continuidade G^2, o componente que executou essa ação foi identificado pela cor azul claro. As correções de posicionamento (1) e origem (2) da curva diretriz (estágio a.2 da fase A da etapa 5) estão identificadas pela cor verde claro para (1) e pela cor laranja para (2). As parametrizações dos valores das duas correções foram identificadas pela cor vermelho e foram localizadas a esquerda dos componentes.

A construção da geratriz foi identificada pela cor verde escuro e a *constraint* indicando o ponto inicial da curva para ser o centro da geratriz foi em vermelho, a esquerda dos componentes da geratriz. A geração da superfície do elemento vertical por varredura está identificada pela cor magenta.

Figura 223 – *Definition* correspondente a modelagem da superfície do elemento vertical

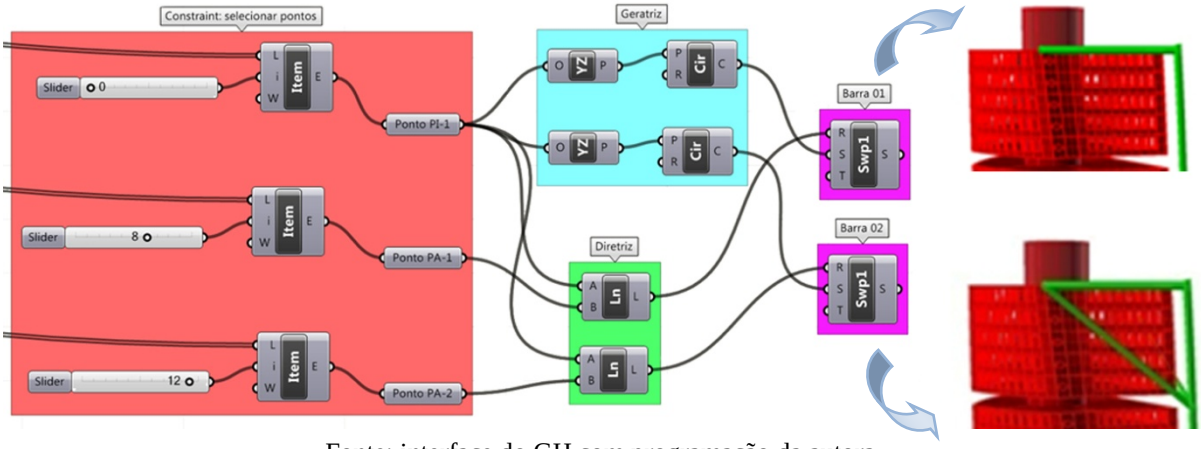


Fonte: interface do GH com programação da autora.

A modelagem da superfície das barras de ancoragem para um bloco de pavimentos relativas as barras superiores, pode ser vista na Figura 224. Da esquerda para direita, tem-se a *constraint* que faz referência aos pontos iniciais e finais das barras (como descrito no item 5.3.3.5) foi identificada pela cor vermelha. A construção das duas diretrizes foi identificada pela cor verde, enquanto a construção das duas geratrizes foi identificada pela cor azul. A geração da superfície das barras superiores por varredura foi identificada pela cor rosa.

[162] Ver item 5.1, sobre o Grasshopper.

Figura 224 – *Definition* correspondente a modelagem da superfície das barras de ancoragem de um módulo



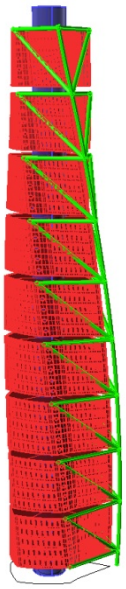
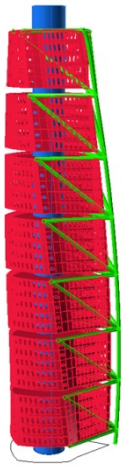
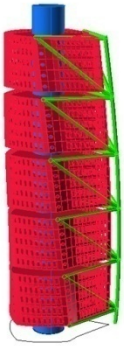
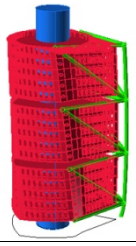
Fonte: interface do GH com programação da autora.

5.2.6 Variações paramétricas

O processo de modelagem foi realizado de modo a possuir parâmetros de modelagem que ao alterarem seus valores, possibilitam a exploração de outras soluções formais, ou seja, as variações paramétricas. Destacam-se três parâmetros de modelagem: o número de blocos de andares (1), o ângulo de rotação dos blocos (2) e a disposição das janelas nas fachadas (3). Para demonstrar tal situação foram produzidas algumas variações de cada um dos parâmetros.

Usou-se como primeiro parâmetro o número de blocos de pavimentos, quando foram usados os valores nove, sete, cinco e três blocos, como visto no Quadro 14.

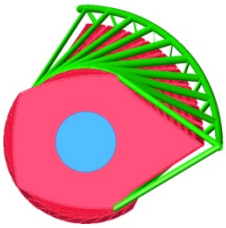
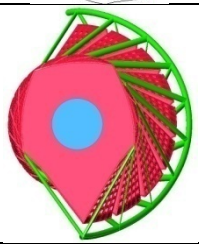
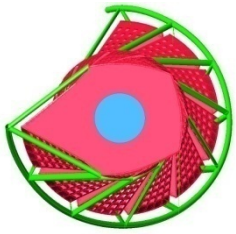
Quadro 14 – Variações do número de blocos dos andares

NÚMERO DE BLOCOS	9	7	5	3
PERSPECTIVA				

Fonte: própria autora

Para o segundo parâmetro foi o ângulo de rotação dos blocos, foram usados os valores de zero, cento e oitenta e, trezentos e sessenta graus, conforme o Quadro 15.

Quadro 15 – Simulação da rotação dos blocos

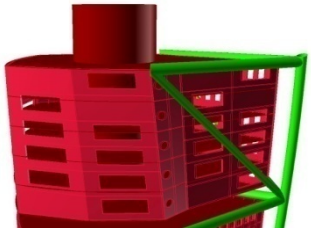
A°	90°	180°	270°	360°
PERSPECTIVA				
PLANTA				

Fonte: própria autora

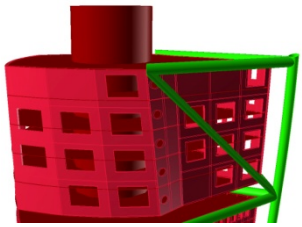
Para ilustrar um terceiro parâmetro escolhido para a simulação, a fachada foi dividida em uma malha para a disposição das janelas, com as seguintes configurações, duas colunas e seis linhas, três colunas e quatro linhas, seis colunas e oito linhas, e nove colunas e duas linhas, como visto na Figura 225.

Figura 225 – Simulação da disposição das janelas nas fachadas, matriz: (a) 2 x 6; (b) 3 x 4; (c) 6 x 8; (d) 9 x 2

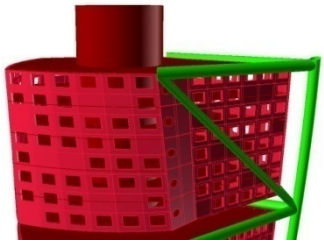
(a)



(b)



(c)



(d)

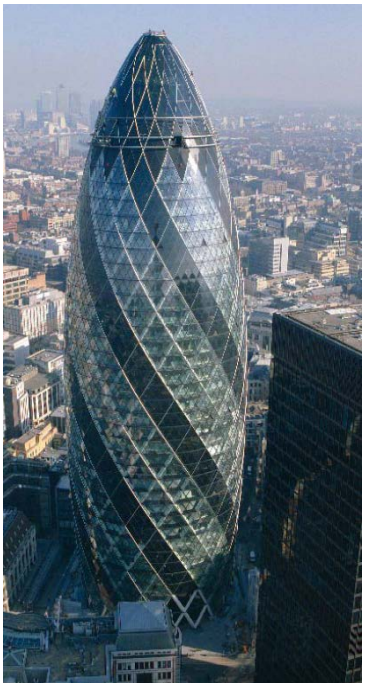
Fonte: própria autora

Após realizar essas variações paramétricas do modelo, a principal particularidade notada foi a capacidade do modelo de manter as relações geométricas de associação e dependência entre os elementos, devido a utilização de parametrização e de *constraints*. Por exemplo, ao alterar-se o valor do ângulo de rotação dos pavimentos, todos os demais elementos, como os blocos e a treliça, acompanharam esse movimento, apresentando comportamento inteligente ao manter agrupados seus elementos.

5.4 Estudo Empírico 3: 30 St. Mary Axe

No Estudo 3 foi modelado o edifício de escritórios 30 St. Mary Axe (Figura 226), localizado em Londres, na Inglaterra e que foi projetado por *Foster and Partners*, em 1997. A descrição dessa obra foi realizada no item 4.2.15.

Figura 226 – Volumetria do 30 St. Mary Axe



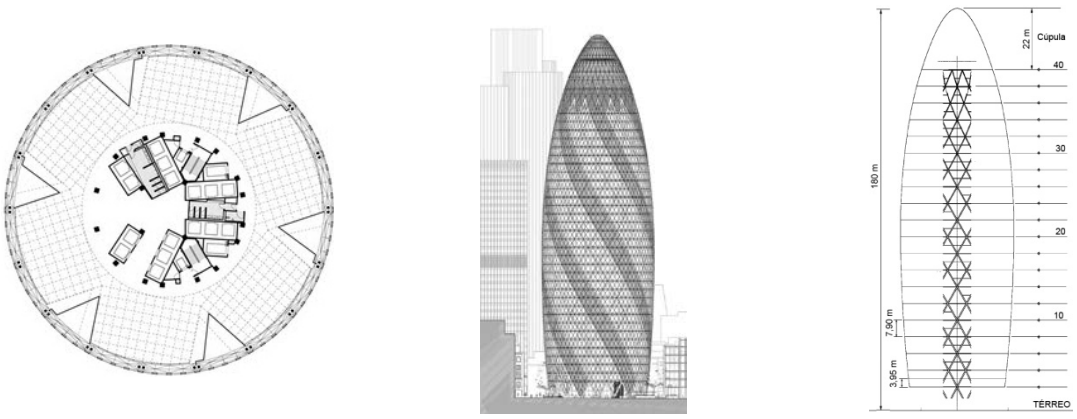
Fonte: JENCKS, 2005, p. 13.

5.4.1 Levantamento de informações

Inicialmente foi realizado o levantamento das informações sobre as características gerais do 30 St. Mary Axe, especialmente no que toca a sua forma. Foram coletadas fotografias, plantas e cortes, das quais se pode destacar a planta do “pavimento tipo” (Figura 227a) e a elevação (Figura 227b). Além disso, informações sobre as dimensões do edifício foram coletadas de textos e representadas em um desenho esquemático do corte (Figura 227c), extraído de Munro (2004, p. 41). Estes elementos esquemáticos foram usados para confecção do gabarito para a modelagem da edificação.

Figura 227 – (a) planta baixa do “pavimento tipo”; (b) elevação; (c) desenho esquemático do corte

(a) (b) (c)



Fonte: (a) e (b) FOSTER AND PARTNERS, 2005, p. 2; (c) MUNRO, 2004, p. 41.

5.4.2 Principais etapas da modelagem

A modelagem desta edificação usou como referência inicial um estudo similar contido na apostila eletrônica Generative Algorithms: using Grasshopper de Zubin Khabazi (2009). O processo não foi seguido literalmente, na medida em que foram feitas alterações e acréscimos a ele.

De forma similar ao Estudo 1 e 2, o processo foi estruturado segundo a hierarquia de três níveis: etapas dividas em fases, que por sua vez são subdividas em estágios. Essa estrutura se desenvolve, para o Estudo 3 em três etapas e seus sub-níveis, como exposto a seguir:

Etapa 1: Confecção do gabarito

Etapa 2: Modelagem da treliça externa da edificação

c) Construção dos elementos verticais (hélices)

a.1) Desenho do perímetro do “pavimento tipo” sobre a imagem

a.2) Cópias dos pavimentos

a.3) Rotação de todos os pavimentos

a.4) Traçado da curva diretriz (hélice cilíndrica)

a.5) Desenho da geratriz (seção transversal da treliça)

a.6) Geração por varredura dos elementos da treliça em um sentido

a.7) Espalhamento dos elementos verticais no sentido oposto

d) Construção dos elementos horizontais (aros)

b.1) Desenho da diretriz

b.2) Desenho da geratriz

b.3) Geração por revolução do elemento horizontal

b.4) Cópia dos elementos horizontais (20 aros)

e) Definição da curvatura ogival da edificação

Etapa 3: Modelagem da cortina de vidro

a) Construção da superfície externa da edificação

a.1) Desenho da geratriz

a.2) Deslocamento da posição da geratriz

a.3) Geração da superfície de revolução

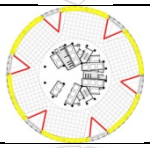
b) Construção da caixilharia da cortina de vidro

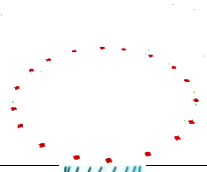
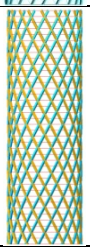
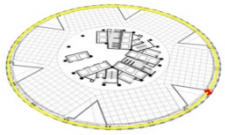
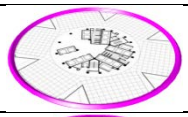
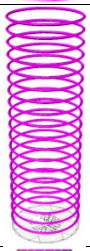
b.1) Modulação dos painéis de fechamento em vidro

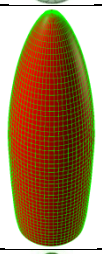
b.2) Geração por varredura dos caixilhos dos painéis de fechamento

A síntese deste processo está contida no Quadro 16.

Quadro 16 – Quadro síntese do processo de modelagem do 30 St. Mary Axe

ETAPA	FASE	ESTÁGIO	SOFTWARE	IMAGEM
(1) Confecção do gabarito			Rhinoceros	
(2) Modelagem da treliça externa da edificação	(A) Construção dos elementos verticais (hélices)	(a.1) Desenho do perímetro do “pavimento tipo” sobre a imagem	Rhinoceros	
		(a.2) Cópias dos pavimentos	Grasshopper	
		(a.3) Rotação de todos os pavimentos	Grasshopper	
		(a.4) Traçado da curva diretriz (hélice cilíndrica)	Grasshopper	

ETAPA	FASE	ESTÁGIO	SOFTWARE	IMAGEM
(2) Modelagem da treliça externa da edificação	(A) Construção dos elementos verticais (hélices)	(a.5) Desenho da geratriz (seção transversal da treliça)	Grasshopper	
		(a.6) Geração por varredura dos elementos da treliça em uma direção	Grasshopper	
		(a.7) Espalhamento dos elementos verticais na direção oposta	Grasshopper	
	(B) Construção dos elementos horizontais (aros)	(b.1) Desenho da diretriz (em amarelo)	Grasshopper	
		(b.2) Desenho da geratriz (em vermelho)	Grasshopper	
		(b.3) Geração por revolução do elemento horizontal	Grasshopper	
		(b.4) Cópia dos elementos horizontais (20 aros)	Grasshopper	
	(C) Definição da curvatura ogival da edificação		Grasshopper	
(3) Modelagem da cortina de vidro	(A) Construção da superfície externa da edificação	(a.1) Desenho da geratriz	Rhinoceros	
		(a.2) Deslocamento da posição da geratriz	Grasshopper	

ETAPA	FASE	ESTÁGIO	SOFTWARE	IMAGEM
(3) Modelagem da cortina de vidro	(A) Construção da superfície externa da edificação	(a.3) Geração da superfície de revolução	Grasshopper	
	(B) Construção da caixilharia da cortina de vidro	(b.1) Modulação dos painéis de fechamento em vidro	Grasshopper	
		(b.2) Geração por varredura dos caixilhos dos painéis de fechamento	Grasshopper	

Fonte: própria autora

5.4.3 Descrição da construção do modelo

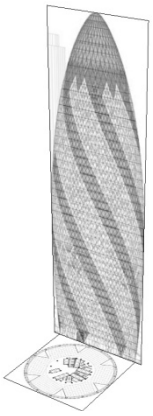
No presente item, detalha-se a modelagem com imagens representativas dos passos mais significativos.

5.4.3.1 Etapa 1: Confecção do Gabarito

Antes de começar a descrição dessa fase da modelagem, deve se esclarecer que o 30 St. Mary Axe não possui planta tipo no sentido mais usual, o qual se refere a uma planta baixa que deverá repetidamente ser construída identicamente nos vários pavimentos. Mas, sim, no sentido de meta-modelo, como visto no item 2.2.2.3 sobre Modelagem Paramétrica, no qual uma forma “padrão” é utilizada para criar cópias semelhantes dela mesma. No caso específico desse Estudo 3, essas cópias da planta do “pavimento tipo”, ampliando o raio do pavimento, do térreo até o 20 pavimento, na metade da altura da edificação, e em seguida, reduz o raio até o ápice da cúpula de fechamento.

Nessa etapa foi executado um gabarito para auxiliar a modelagem da forma geral da edificação, baseado na planta do “pavimento tipo” e na sua elevação. Estas imagens foram importadas, escaladas e dispostas perpendicularmente no ambiente de modelagem do Rhinoceros, com suas projeções alinhadas, como visto na Figura 228.

Figura 228 – Alinhamento entre planta do “pavimento tipo” e elevação da edificação



Fonte: adaptada pela própria autora.

5.4.3.2 Etapa 2: Modelagem da treliça externa da edificação

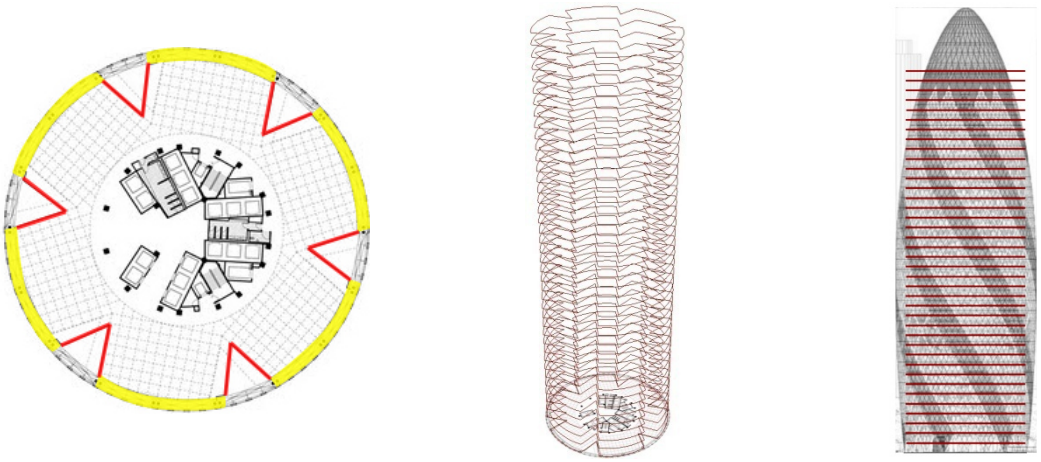
Na segunda etapa, foi modelada a superfície da treliça estrutural, em parte por modelagem por varredura e na outra parte por modelagem por revolução, além da aplicação da operação de transformação de escala para gerar a curvatura da edificação. Por isso, foi divido em três fases: construção dos elementos verticais (A), construção dos elementos horizontais (B) e definição da curvatura ogival da edificação (C).

Na fase A, a construção da superfície dos elementos verticais foi executada por modelagem de varredura e foi descrita em sete estágios: desenho do perímetro do “pavimento tipo” sobre a imagem (a.1), cópias dos pavimentos (a.2), rotação de todos os pavimentos (a.3), traçado da curva diretriz (a.4), desenho da geratriz (a.5), geração por varredura dos elementos da treliça em um sentido (a.6) e espalhamento dos elementos verticais no sentido oposto (a.7).

No primeiro estágio (a.1), foi desenhado o perímetro do “pavimento tipo” sobre a imagem da planta no gabarito no Rhinoceros. O contorno do pavimento foi constituído por seis arcos (em amarelo na Figura 229a), que tocam a superfície externa do edifício e doze segmentos de reta (em vermelho na Figura 229a), que indicam dois lados da forma triangular do átrio. A importância da utilização dessas dezoito linhas é explicada adiante.

Figura 229 – (a) perímetro da “planta tipo”, trechos curvos em amarelo e trechos retos em vermelho; 40 perímetros: (b) em perspectiva; (c) sobrepostas a elevação da edificação;

(a) (b) (c)



Fonte: própria autora

No segundo estágio (a.2), foram realizadas cópias do perímetro na direção vertical correspondentes ao intervalo do térreo ao quadragésimo andar, uma vez que a treliça termina nesse pavimento, pois a partir desse ponto há a cúpula formada somente pela cortina de vidro. Como visto no Estudo 2, no GH é possível realizar múltiplas cópias simultaneamente, ao se parametrizar[163] os valores dos números de cópias e a distância entre elas, ao tornar esses valores em dados de entrada (*input*) implícitos. Para este caso, foram realizadas quarenta cópias distanciadas em 3,95 metros uma das outras (Figura 229b e 229c).

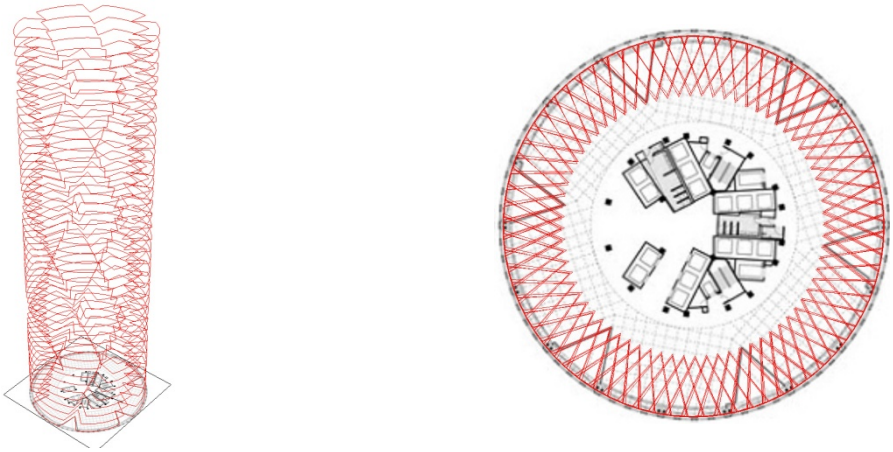
No terceiro estágio (a.3), foi realizada a rotação progressiva em todos os contornos de pavimento para criar a aparência de torção da treliça. Foi utilizado o mesmo processo de parametrização que no estágio a.2, onde tem-se como os valores de dados de entrada (*input*), o ângulo de rotação entre dois pavimentos consecutivos e o número que determina a quantidade de contornos a serem rotacionados. Neste caso, foi aplicado 0,09[164] radianos (unidade padrão do GH) entre um contorno e o seguinte, repetindo essa operação continuamente até o último. O resultado pode ser visto na Figura 230.

[163] Esse valor pode ser modificado pelo usuário a qualquer momento e as alterações correspondentes serão automaticamente ajustadas pela ferramenta de modelagem paramétrica, neste caso, o Grasshopper. Maiores detalhes sobre parametrização no item 2.2.2.2.

[164] Equivalente a 5º, o ângulo de rotação entre pavimentos, de acordo com a informação compilada.

Figura 230 – 40 contornos de pavimentos rotacionados: (a) em perspectiva; (b) em planta baixa;

(a) (b)

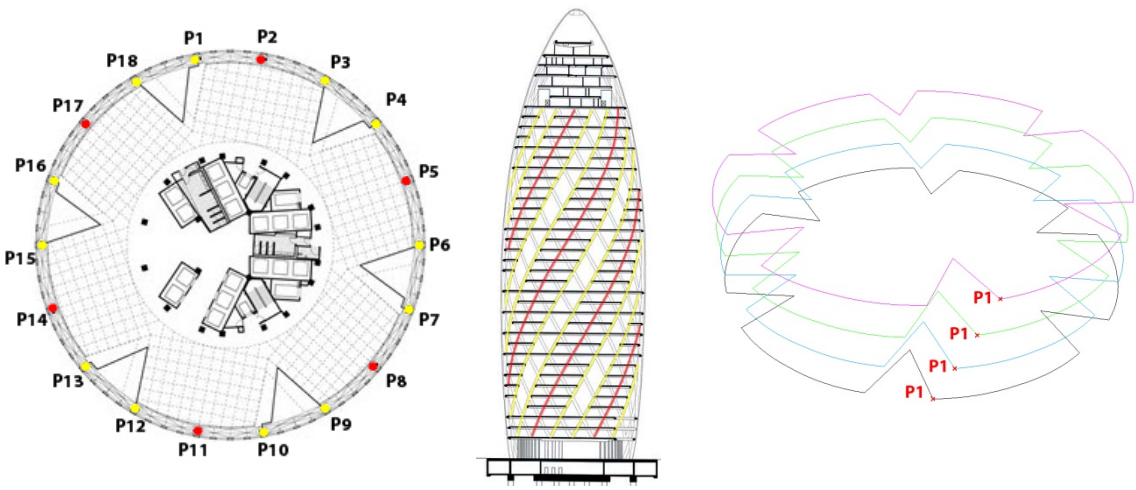


Fonte: própria autora

No quarto estágio (a.4), foram geradas as curvas diretrizes que representam o eixo de cada um dos elementos verticais e foram definidas, de acordo com o levantamento, como uma curva espacial (hélice) que descreve o trajeto percorrido, da base ao topo da edificação, por cada um dos dezoito pontos que dividem igualmente a circunferência na qual a planta baixa "estrelada" está inscrita. Esses pontos podem ser divididos em seis grupos, no qual cada grupo tem-se três pontos pertencentes a cada "ponta" da planta tipo, sendo dois posicionados na extremidade (em amarelo na Figura 231a) e um no ponto médio (em vermelho na Figura 231a). As curvas espaciais formadas por esses pontos são de um total de 36, pois em cada um dos 18 pontos existem duas hélices, uma em sentido horário e outra no sentido oposto. Exemplo dessa curva em uma direção, pode ser visto na Figura 231 (b).

Figura 231 – Em amarelo e vermelho: (a) pontos de passagem da treliça em cada pavimento e suas designações; (b) hélices formadas pela trajetória dos pontos em uma direção; (c) esquema ilustrativo da série de pontos com mesma designação;

(a) (b) (c)



Fonte: adaptada pela própria autora.

Para construir essa curva espacial, no GH, foram usados como referência cada um desses dezoito pontos em cada planta do pavimento tipo, assim cada hélice obrigatoriamente passou sobre quarenta pontos, de maneira similar a interpolação descrita no item 3.2.1.1. Em maiores detalhes, cada um dos 18 pontos recebeu uma designação, como vista na Figura 231 (a), que se repete nas quarentas "plantas tipo". Cada curva passou sobre a série de pontos com mesma designação (por exemplo, P1, ver Figura 231c), somando quarenta pontos, como exposto, em laranja, na Figura 228 (a). O resultado pode ser visto nas Figuras 232 (b) e (c).

Figura 232 – (a) seleção de todos os pontos P1; conjunto de 18 hélices cilíndricas (diretrizes) em sentido anti-horário, em verde: (b) em perspectiva; (c) em elevação

(a) (b) (c)

Fonte: própria autora

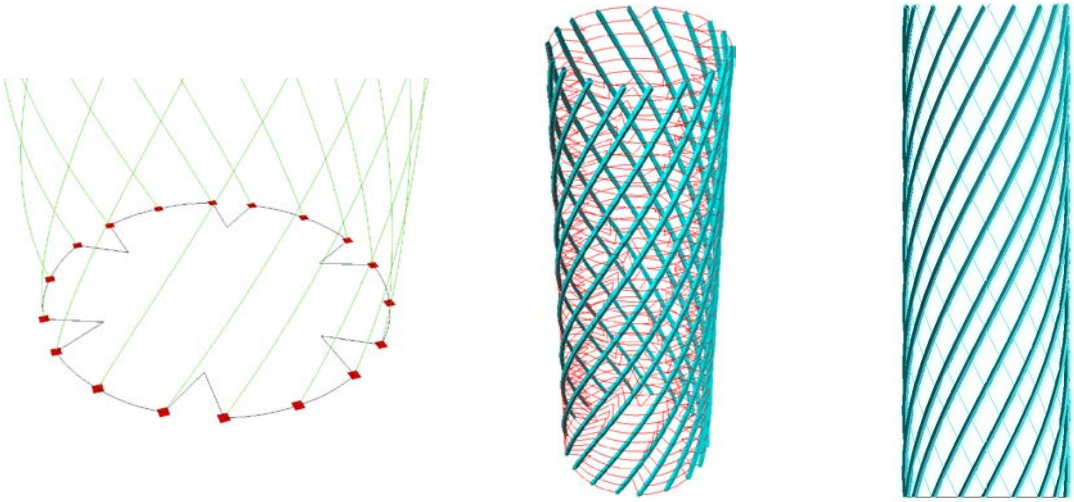
Deve-se apontar que a definição desses pontos como referência para geração da curva foi determinada como uma *constraint* de hierarquia[165], de modo que se fosse alterada a posição desse ponto, a forma da curva também se alteraria. Além disso, usou-se uma *constraint* semântica de controle de dados para selecionar cada série de quarenta pontos de referência sob a mesma designação (Figura 232a), para se criar uma curva específica correspondente a cada uma das 18 hélices, também permitindo que todas fossem geradas simultaneamente.

No quinto estágio (a.5), foi desenhada a curva geratriz, ou seja, a seção transversal do elemento vertical, que possui forma de losango com diagonal de aproximadamente de 0,85 m. Como são 18 diretrizes, também foram geradas 18 geratrizes, cujos centros (Figura 233a) estão posicionados na base da curva diretriz produzida no estágio a.4. Deve-se destacar que essa relação foi determinada como uma *constraint* de hierarquia, de modo que se alterasse a curva, a posição do losango também se alteraria.

[165] Ver item 2.2.2.4, que trata de novos tipos de *constraint*.

Figura 233 – (a) Em vermelho, 18 geratrizes na base de cada diretriz (em verde); superfície de varredura dos 18 elementos verticais, em azul: (a) em perspectiva; (b) em elevação

(a) (b) (c)



Fonte: própria autora

No sexto estágio (a.6), foi gerada a superfície do elemento vertical por varredura, quando se usou como diretriz a curva espacial produzida no estágio a.4 e como geratriz o losango produzido no estágio a.5. O resultado por ser visto na Figura 233 (b) e 233 (c).

No sétimo estágio (a.7), gerou-se uma cópia do conjunto de dezoito elementos verticais na direção oposta, mediante espelhamento[166]. Na Figura 234, vê-se o conjunto de elementos verticais em sentido anti-horário em azul e em sentido horário em laranja.

Figura 234 – Dois conjuntos de 18 elementos verticais da treliça: (a) em perspectiva; (b) em elevação

(a) (b)

Fonte: própria autora

Na fase B, foram construídos os elementos horizontais da treliça, que possuem forma de aros (como mencionado no item 4.2.15). Esse procedimento foi divido em quatro estágios:

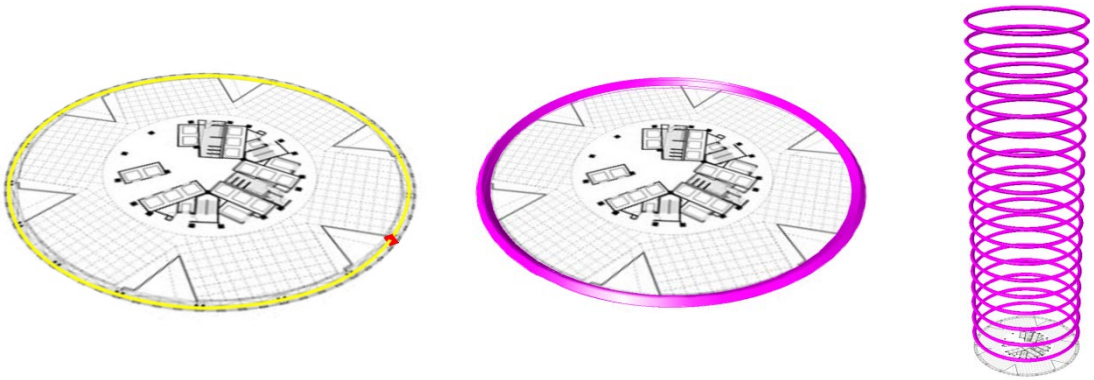
[166] Ver item 3.2.2.2.1, sobre métodos de transformações geométricas.

desenho da diretriz (b.1), desenho da geratriz (b.2), geração por revolução do elemento horizontal (b.3) e cópia dos elementos horizontais (b.4).

No primeiro estágio (b.1), foi desenhada a curva diretriz, que é correspondente a circunferência, na qual a planta do "pavimento tipo" está inserida. No segundo estágio (b.2), foi desenhada a curva geratriz, ou seja, a seção transversal do elemento horizontal, que possui forma de losango com diagonal de aproximadamente de 0,85 metros. Esse losango possui como centro um ponto sob a circunferência da diretriz e está posicionado perpendicular ao plano no qual a diretriz está inserida (Figura 235a). Deve-se destacar que essas relações de referência e perpendicularidade entre a geratriz e diretriz foram determinadas como uma *constraint* de hierarquia[167], de modo que se fosse alterada a posição desse ponto, também se alteraria a posição do losango.

Figura 235 – (a) diretriz (em amarelo) e geratriz (em vermelho) perpendicular entre si; (b) em magenta, superfície de revolução (aro); (c) resultado do estágio b.4: todos os aros

(a) (b) (c)



Fonte: própria autora

No terceiro estágio (b.3), foi gerada a superfície do elemento horizontal por revolução, quando se usou como diretriz a circunferência produzida no estágio b.1 e como geratriz o losango produzido no estágio b.2. O resultado foi o aro, que pode ser visto na Figura 235 (b).

No quarto estágio (b.4), foi executadas cópias do aro, num total de 20, pois esses elementos horizontais foram posicionados a cada dois pavimentos, começando no segundo pavimento. Como visto no Estudo 2, no GH é possível realizar múltiplas cópias simultaneamente, ao se parametrizar[168] os valores dos números de cópias, a distância entre elas e a posição da primeira cópia, ao tornar esses valores em dados de entrada (*input*) implícitos. Para este caso, foram realizadas vinte cópias distanciadas em 7,90 m uma das outras (a cada dois pés direito),

[167] Ver item 2.2.2.4, que trata de novos tipos de *constraint*.
[168] Esse valor pode ser modificado pelo usuário a qualquer momento e as alterações correspondentes serão automaticamente ajustadas pelo Grasshopper. Maiores detalhes sobre parametrização no item 2.2.2.2.

com a primeira cópia à essa mesma distância do solo (altura do primeiro aro). O resultado pode ser visto na Figura 235 (c).

Na Fase C, foi definida a curvatura ogival da edificação pela aplicação de escala progressiva nas plantas do “pavimento tipo”, para criar a variação do diâmetro como descrito no item 5.4.3.1, pois até esse momento as plantas possuem a mesma dimensão. Como não se sabia o fator de escala exato a ser aplicado a cada uma dessas plantas foi necessário ajustar os valores gradualmente e compatibilizar visualmente com o gabarito (imagem da elevação). Para tanto foi utilizado o mesmo processo de parametrização que no estágio a.2 (fase A da etapa2), mas nessa fase os dados de entrada (*input*) são o fator de escala e o número que determina a quantidade de plantas que devem receber a transformação de escala. Neste caso, foi definido um fator de escala específico para cada uma das quarentas plantas. Essa definição foi orientada por uma *constraint* semântica de controle de dados, que gerou uma sequência de valores que crescessem até a metade e depois decrescessem na mesma proporção, guiados por uma equação parabólica. Esses valores representam os fatores de escala que por tentativa alcançou-se a compatibilização visual com o gabarito (Figura 236b).

Figura 236 – Em vermelho: (a) pavimentos antes de serem escalados; (b) pavimentos escalados e ajustados à elevação do edifício

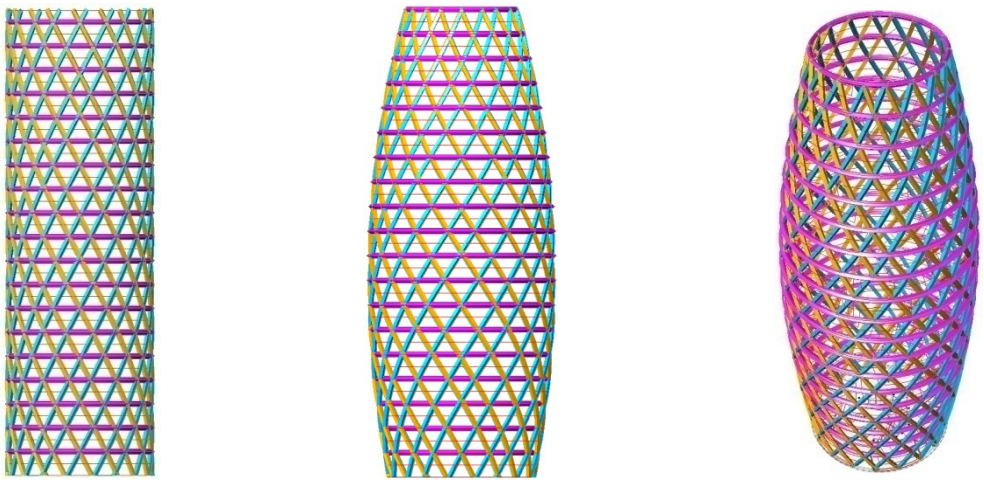
(a) (b)

Fonte: própria autora

Uma vez que os elementos geradores da treliça são guiados por relações geométricas (*constraints*) à planta de “pavimento tipo”, como os pontos de referência, quando essas plantas foram escaladas progressivamente, também a treliça se modificou automaticamente, passando de “hélices cilíndricas” (Figura 237b) a “hélices ogivais” (Figura 237b).

Figura 237 – (a) treliça composta de hélices cilíndricas; treliça composta de “hélices ogivais” (b) em elevação; (c) em perspectiva

(a) (b) (c)



Fonte: própria autora

5.4.3.2 Etapa 3: Modelagem da cortina de vidro

Na terceira etapa foi modelada a cortina de vidro que é o fechamento externo da edificação e, portanto, é externa a treliça. Esse processo foi divido em duas fases: construção da superfície externa da edificação (A) e construção da caixilharia da cortina de vidro (B).

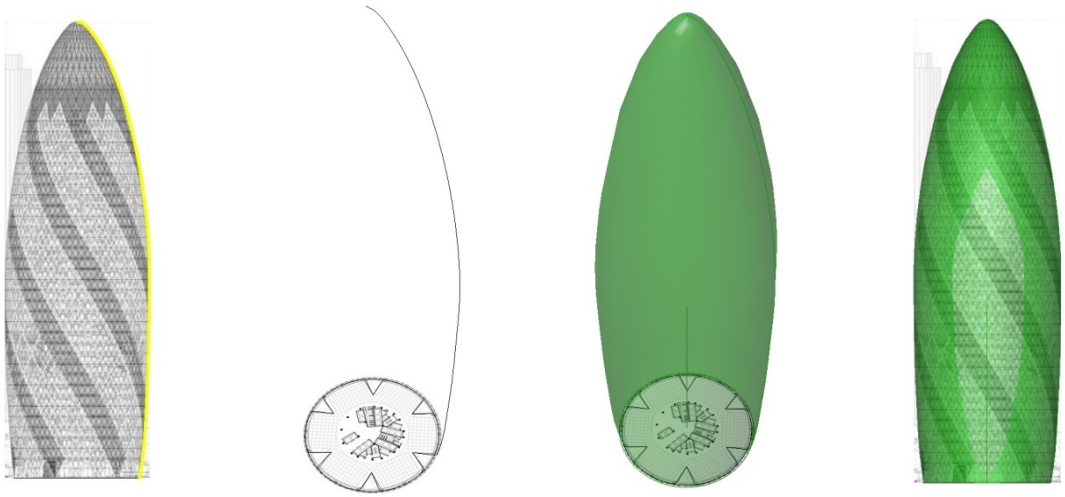
Na Fase A, o processo de geração por revolução da superfície externa foi divida em três estágios: desenho da geratriz (a.1), deslocamento da posição da geratriz (a.2) e geração da superfície de revolução (a.3).

No primeiro estágio (a.1), foi desenhada a curva diretriz sobre a imagem da elevação no gabarito, no Rhinoceros. Essa curva possui a forma da metade do perfil da elevação, como exposto na Figura 238 (a), e foi alinhada com planta do gabarito (Figura 234b), de modo que esteja na posição para geração por revolução. No segundo estágio (a.2), importou-se a curva do estágio a.1 para GH e realizou-se uma correção na posição da diretriz, afastando-a paralelamente à uma distância de dois metros, de modo a encobrir a treliça, que antes desse procedimento se encontrava externa a superfície de revolução.

No terceiro estágio (a.3), gerou-se a superfície de revolução com o eixo vertical no centro da planta tipo e a curva diretriz do estágio a.2. O resultado pode ser visto na Figura 238 (c) e (d).

Figura 238 – Geratriz e superfície de revolução: (a) em amarelo, curva perfil da edificação; (b) geratriz alinhada com a planta; (c) superfície em perspectiva; (d) superfície sobreposta à elevação

(a) (b) (c) (d)



Fonte: própria autora

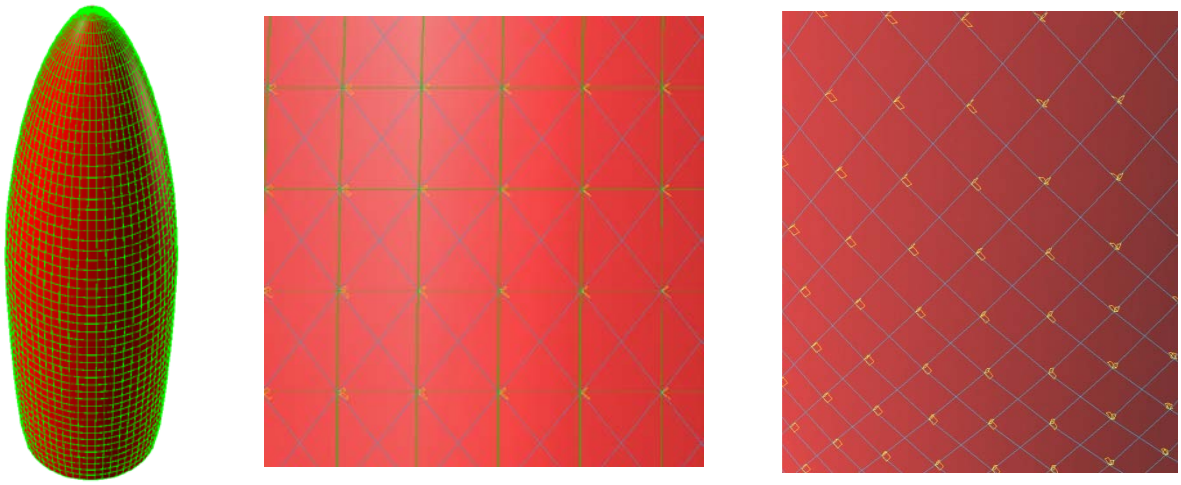
Na Fase B, foi construída a caixilharia da cortina de vidro em dois estágios: modulação dos painéis de fechamento em vidro (b.1) e geração por varredura dos caixilhos dos painéis de fechamento (b.2).

No primeiro estágio (b.1), a malha de painéis foi definida de maneira semelhante ao processo de definição de superfície de forma livre e seus retalhos. Como visto no item 3.2.1.2, essas superfícies são definidas por equações (paramétricas) de dois parâmetros, padronizados "*u*" e "*v*". Do mesmo modo, no GH, a malha foi determinada ao se dispor geratrizes seguindo as direções "*u*" e "*v*" da superfície do estágio a.3 (fase A da etapa 3), a partir do qual foram realizadas as operações do estágio seguinte. Neste caso, admitiu-se, por tentativas, 62 geratrizes na direção "*u*" e 52 na "*v*" (Figura 239a), como um resultado visualmente aproximado da modulação da caixilhiaria da edificação.

No segundo estágio (b.2), foi construído os caixilhos a partir do módulo da malha. Como visto no item 4.2.15, a cortina de vidro é composta de painéis em formato de losangos e triângulos, que por questão de conveniência de trabalho, foi usado somente o primeiro formato. Para construir esse losango, em cada módulo da malha (em verde na Figura 239b) foram gerados dois perfis, um em cada diagonal do módulo (em azul na Figura 239b). Esses perfis foram gerados por varredura, onde a diagonal foi a diretriz e um quadrado (em amarelo na Figura 239b e 239c) de vinte centímetros de lado foi a geratriz. Deve-se destacar que o posicionamento do quadrado foi definido com uma *constraint* de hierarquia em relação aos vértices formados pelo módulo da malha.

Figura 239 – (a) em verde, malha da modulação; (b) Em vista aproximada: malha da modulação (em verde), diagonais (diretriz - em azul) e quadrados (geratriz - em amarelo); (c) Em perspectiva aproximada e sem visualização da malha: diagonais (diretriz - em azul) e quadrados (geratriz - em amarelo)

(a) (b) (c)



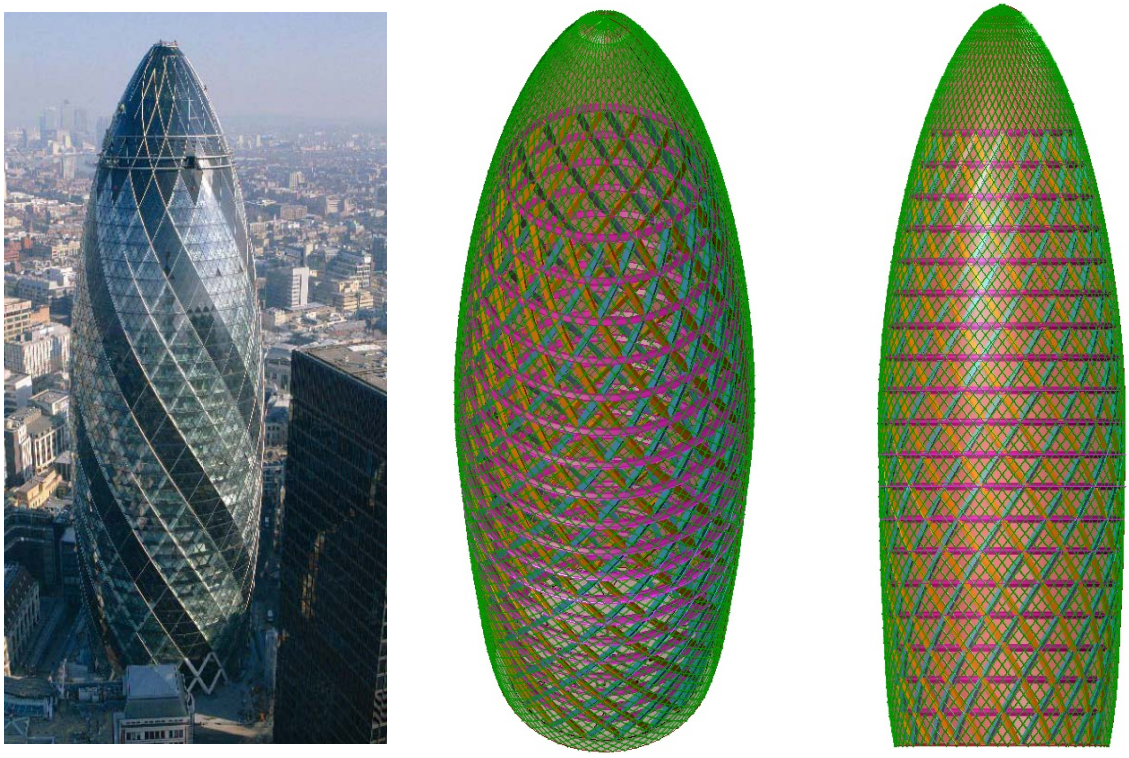
Fonte: própria autora

5.4.4 Apresentação do modelo final

Após a execução das etapas de modelagem descritas a anteriormente, alcançou-se um modelo aproximado do 30 St. Mary Axe, As diferenças e semelhanças entre esse modelo e a obra original por ser visto na Figura 240 e 241.

Figura 240 – 30 St. Mary Axe: (a) vista da edificação concluída; modelo geométrico do estudo 3 criado no GH em perspectiva (b) e em vista (c)

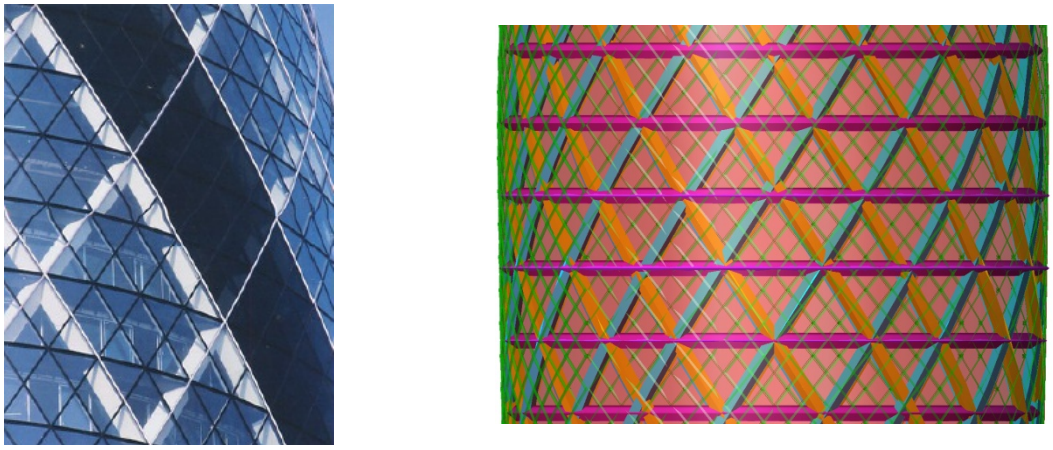
(a) (b) (c)



Fonte: (a) JENCKS, 2005, p. 13; (b) e (c) própria autora.

Figura 241 – 30 St. Mary Axe: (a) fotografia aproximada da fachada da edificação; (b) detalhe aproximado do modelo geométrico em vista

(a) (b)



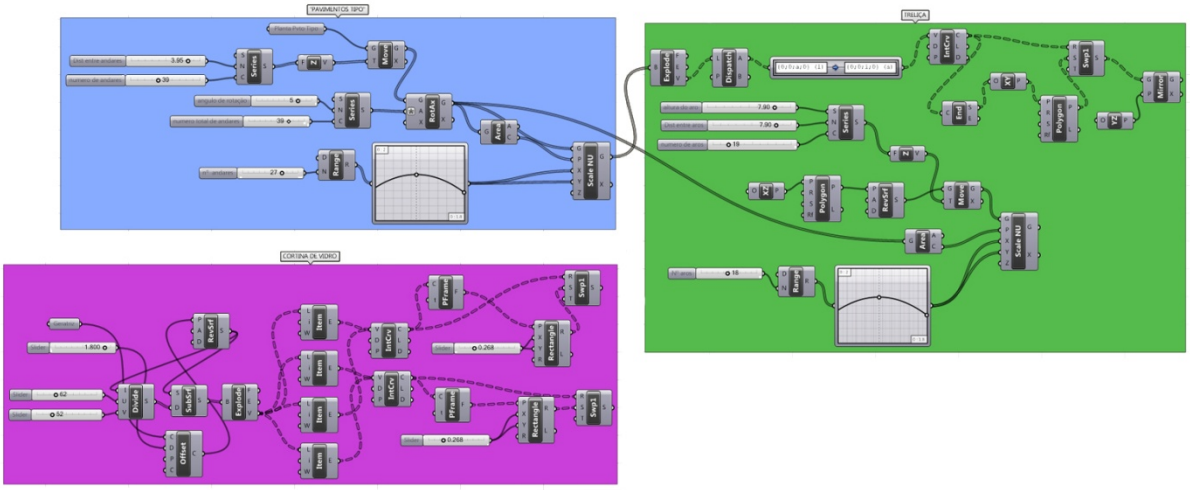
Fonte: (a) HYATT; HYATT, 2006, p. 15; (b) própria autora

5.4.5 Aspectos de modelagem no Grasshopper

A *definition*[169] resultante do Estudo 3 pode ser vista na Figura 242. Como essa *definition* é bem extensa, os seus componentes foram reunidos em grupos correspondentes aos elementos da edificação: todos os perímetros dos "pavimentos tipo" em azul, a treliça em verde e a cortina de vidro em roxo.

Esses grupos foram descritos em maiores detalhes a seguir, onde foram indicadas as principais etapas de modelagem, as quais foram designadas cores. Em todos esses grupos, os componentes que realizaram parametrização e *constraints* foram identificados em vermelho.

Figura 242 – *Definition* correspondente ao modelo geométrico final do 30 St. Mary Axe

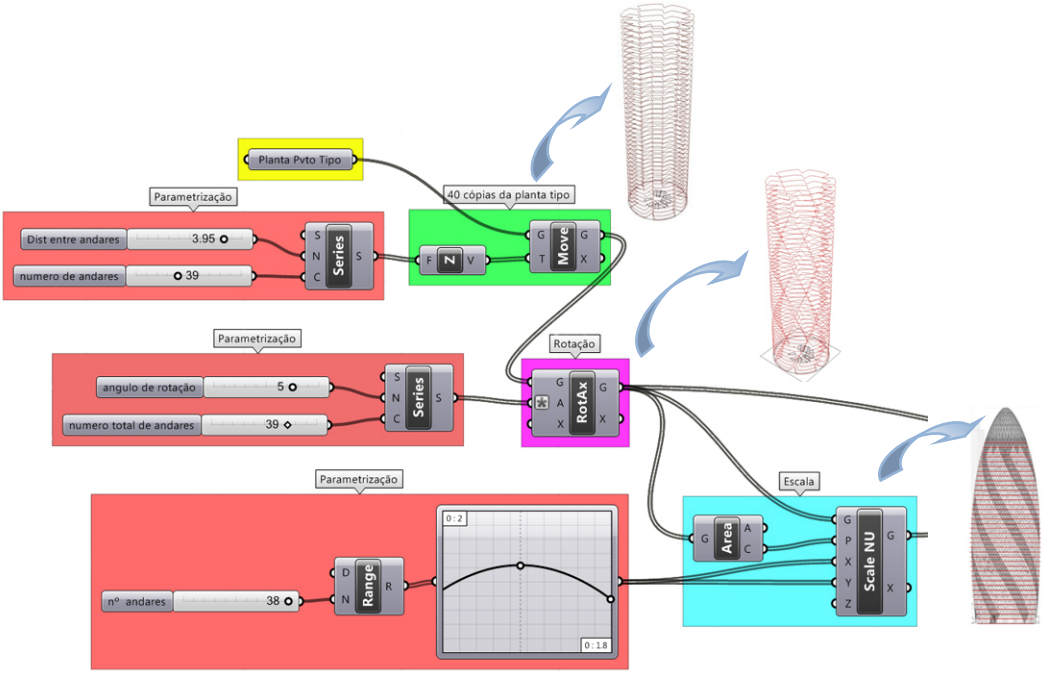


Fonte: interface do GH com programação da autora.

[169] Como visto no item 5.1, a *definition* representa a sequência de instruções de modelagem para a geração de um modelo geométrico.

Na Figura 243, tem-se o componente que importou o perímetro do “pavimento tipo” para o GH, que recebeu o nome de **Planta Pvto Tipo** foi identificado pela cor amarelo. As quarenta cópias do perímetro foram identificadas pela cor verde (estágio a.2 da fase A da etapa 2), com a correspondente parametrização dos *input* em vermelho e a esquerda. A rotação de todos os contornos foi identificada pela cor magenta (estágio a.3 da fase A da etapa 2), com a correspondente parametrização dos *input* em vermelho e a esquerda. A definição da curvatura ogival da edificação foi identificada pela cor azul claro (fase C da etapa 2), com a correspondente parametrização dos *input* em vermelho e a esquerda.

Figura 243 – *Definition* correspondente cópias, rotação e aplicação de escala nos perímetros do “pavimento tipo” da edificação

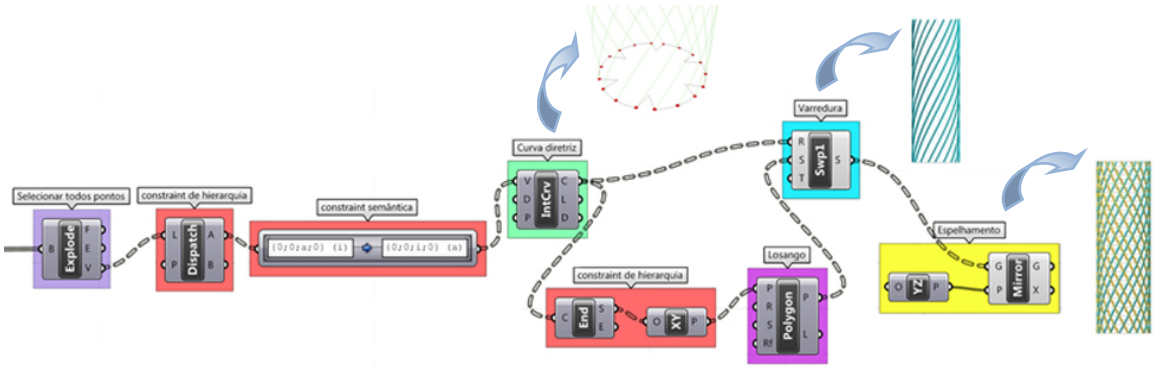


Fonte: interface do GH com programação da autora.

A Figura 244, representa a Fase A da Etapa 2, construção dos elementos verticais (hélices). Da esquerda para a direita, tem-se a seleção de todos os 18 pontos em todos os 40 pavimentos foi identificada pela cor lilás. As *constraints* de hierarquia e semântica que organizaram a seleção de cada série de 18 pontos e os tornaram referência para criação da diretriz foram identificadas pela cor vermelho. O traçado da curva diretriz (estágio a.4 da fase A da etapa 2) foi identificado pela cor verde claro. A *constraint* de hierarquia que posicionou o centro do losango na base da diretriz foi identificada pela cor vermelho. O desenho da geratriz (estágio a.5 da fase A da etapa 2) foi identificado pela cor roxo. A geração por varredura dos elementos da treliça em uma direção (estágio a.6 da fase A da etapa 2) foi identificada pela

cor azul claro. Por fim, o espalhamento dos elementos verticais na direção oposta (estágio a.7 da fase A da etapa 2) foi identificado pela cor amarelo.

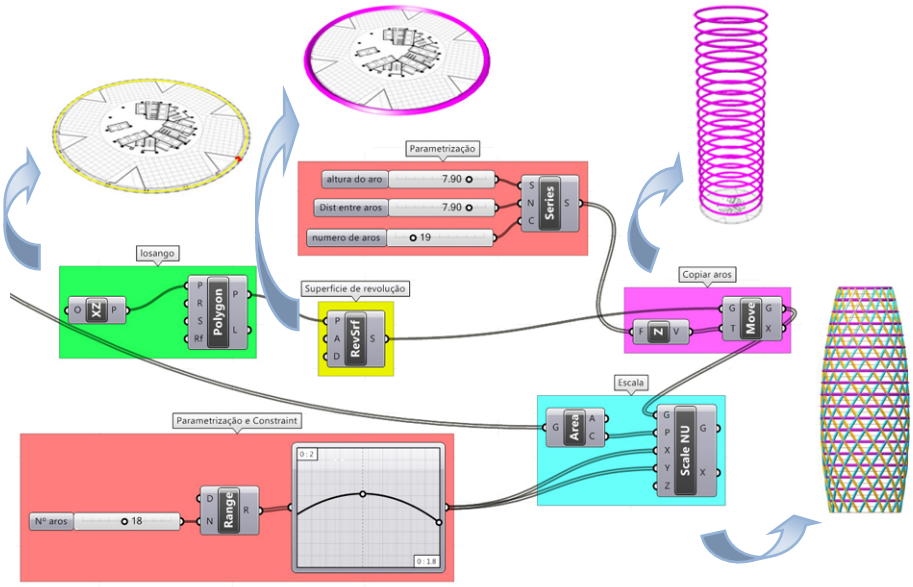
Figura 244 – *Definition* correspondente a construção dos elementos verticais (hélices)



Fonte: interface do GH com programação da autora.

A Figura 245, representa a Fase B da Etapa 2, construção dos elementos horizontais (aros). O desenho da geratriz (estágio b.2 da fase B da etapa 2) foi identificado pela cor verde. A geração por revolução do elemento horizontal (estágio b.3 da fase B da etapa 2) foi identificado pela cor amarelo. A cópia dos elementos horizontais (estágio b.4 da fase B da etapa 2) foi identificado pela cor magenta. Por questões de implementação do GH, teve-se que repetir a aplicação da escala progressiva da fase C da etapa 2 aos elementos horizontais, que foi identificada pela cor azul claro com a parametrização correspondente em vermelho e a esquerda.

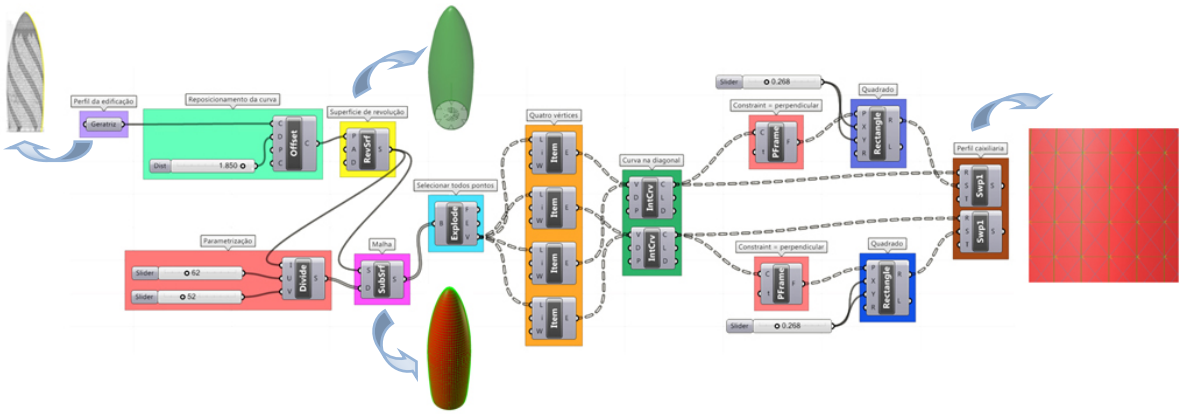
Figura 245 – *Definition* correspondente a construção dos elementos horizontais (aros)



Fonte: interface do GH com programação da autora.

A Figura 246, representa a Etapa 3, modelagem da cortina de vidro. Da esquerda para a direita, tem-se o componente que importou o meio perfil da edificação para o GH, que recebeu o nome de **geratriz** e foi identificado pela cor lilás. O deslocamento da posição da geratriz (estágio a.2 da fase A da etapa 3) foi identificado pela cor verde claro. A geração da superfície de revolução (estágio a.3 da fase A da etapa 3) foi identificada pela cor amarelo. A modulação dos painéis de fechamento em vidro (estágio b.1 da fase B da etapa 3) foi identificada pela cor magenta, com a parametrização correspondente em vermelho e a esquerda.

Figura 246 – Definition correspondente a modelagem da cortina de vidro



Fonte: interface do GH com programação da autora.

Ainda na Figura 246, a geração por varredura dos caixilhos dos painéis de fechamento (estágio b.2 da fase B da etapa 3) foi realizada por um número de diferentes componentes, que serão descritos a seguir. O componente que realizou a seleção de todos os vértices da malha foi identificado pela cor azul turquesa. Os componentes que realizaram a seleção dos quatro pontos de referência para criar as diagonais, foram identificados pela cor laranja. A curva diretriz (diagonal) foi identificada pela cor verde escuro. A geratriz (quadrado) foi identificada pela cor azul escuro, com a *constraint* de perpendicularidade correspondente em vermelho e a esquerda. Por fim, a superfície de varredura foi identificada pela cor marrom.

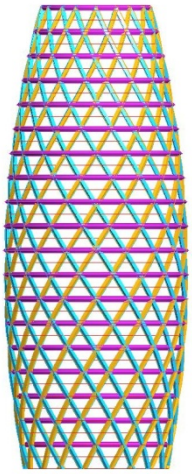
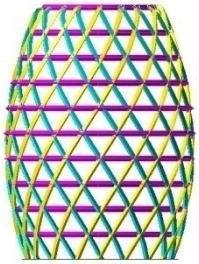
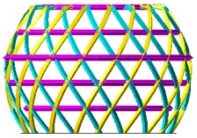
5.4.6 Variações paramétricas

O processo de modelagem foi realizado de modo a possuir parâmetros de modelagem que ao alterarem seus valores, possibilitam a exploração de outras soluções formais, ou seja, as variações paramétricas. Destacam-se quatro parâmetros de modelagem: o número total de pavimentos (1), o ângulo de rotação dos pavimentos (2), número de pavimentos a serem

escalados (3) e valores e tipos de gráficos que guiaram a sequência de fatores de escala (4). Para demonstrar tal situação foram produzidas algumas variações de cada um dos parâmetros.

Para o primeiro parâmetro foram usados os valores quarenta, trinta, vinte e dez pavimentos, como visto no Quadro 17.

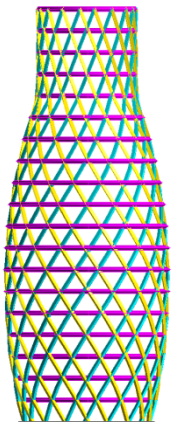
Quadro 17 – Variações do número de pavimentos da edificação

NÚMERO DE PAVTOS	40	30	20	10
PERSPECTIVA				

Fonte: própria autora

Para o segundo parâmetro, no qual se modificou o número de pavimentos[170] a receberam a aplicação da escala, foram usados os valores de trinta, vinte e três, e onze pavimentos.

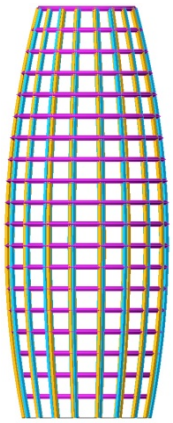
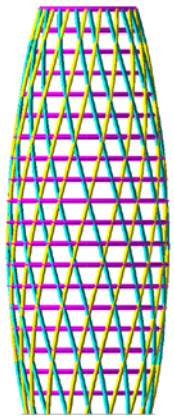
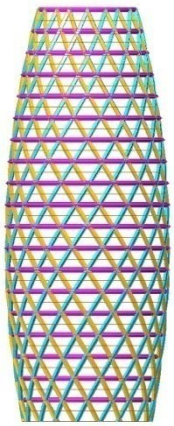
Quadro 18 – Variações do número de pavimentos a receberam a aplicação da escala

NÚMERO DE PAVTOS	30	23	11
PERSPECTIVA			

[170] Lembrando que a distância entre cada aro magenta é equivalente a dois pavimentos.

Para o terceiro parâmetro, foram usados os valores: zero, dois, cinco e quinze graus para o ângulo de rotação dos pavimentos. No Quadro 19, mostra-se o resultado das alterações do ângulo de rotação na treliça, uma vez que ela foi construída por meio de relações geométricas associativas em referência a elementos da planta dos pavimentos.

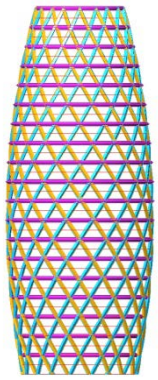
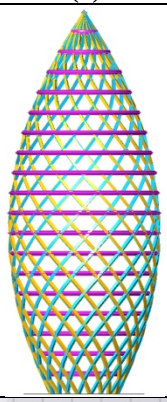
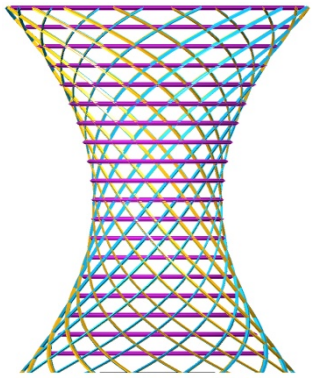
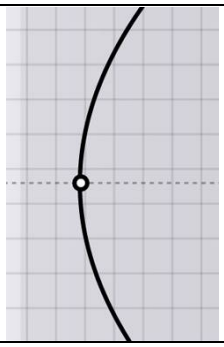
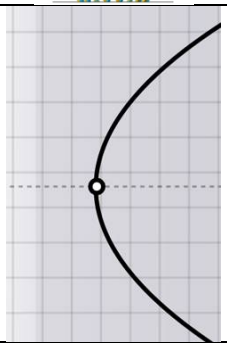
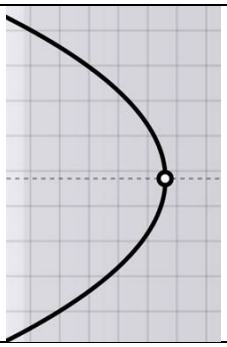
Quadro 19 – Efeitos na treliça resultante das variações no ângulo de rotação dos pavimentos

ÂNGULO DE ROTAÇÃO	0°	2°	5°	15°
PERSPECTIVA				

Fonte: própria autora

Para o terceiro parâmetro foram realizadas mudanças de valores no gráfico da parábola que guiou a geração da sequência numérica dos fatores de escala dos pavimentos na fase C da etapa 2 no item 5.4.3.2. Como resultado tem-se três exemplos (Quadro 20). Para facilitar o entendimento da aplicação da função, seus gráficos foram rotacionados (em 90º no sentido anti-horário), para que visualmente a curvatura tanto do gráfico como do modelo da treliça sejam compatíveis. Assim, pode-se perceber que os exemplos das colunas (a) e (b) possuem curvatura contrária ao da coluna (c).

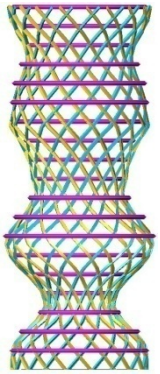
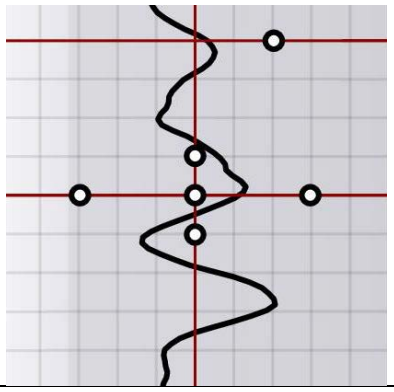
Quadro 20 – Variação nos valores da função parábola

	(a)	(b)	(c)
MODELO GEOMÉTRICO			
GRÁFICO			

Fonte: própria autora

Além disso, trocou-se o tipo de gráfico de parábola para o Perlin[171], o resultado pode ser visto na Quadro 21.

Quadro 21 – Aplicação da função Perlin ao invés da parábola

Modelo geométrico	Gráfico
	

Fonte: própria autora

Após realizar essas variações paramétricas do modelo, a principal particularidade notada foi a capacidade do modelo de manter as relações geométricas de associação e dependência entre os elementos, devido a utilização de parametrização e de *constraints*. Por exemplo, ao alterar-

[171] Função Perlin é chamada de função ruído e foi criada por Ken Perlin, em 1985, para modelagem procedural por textura sólida (GOMES; VELHO, 1990, p. 158).

se o valor do ângulo de rotação dos pavimentos, a treliça acompanhou esse movimento, apresentando comportamento inteligente ao manter agrupados seus elementos.

5.5 Análise Geral dos Estudos Empíricos

A partir dos diferentes estudos empíricos realizados é possível fazer uma avaliação qualitativa dos procedimentos técnicos adotados, de modo a apontar as capacidades e as limitações da aplicação da Modelagem Paramétrica para a concepção formal de edificações.

Pode-se perceber que uma das capacidades da MP é otimizar os procedimentos de modelagem. Não apenas diminuindo o re-trabalho existente no momento de realizar alterações no modelo, como também automatizando operações repetitivas de modelagem.

O primeiro caso é suportado pela parametrização do modelo que, junto com o *history l*og, permite que o sistema paramétrico regenere automaticamente o modelo após modificações em seus parâmetros. Um exemplo da aplicação dessa capacidade pode ser visto, no item 5.2.3.3 do Estudo 1, na fase A da etapa 3 do processo de modelagem, na qual o traçado da malha de painéis sobre a superfície externa de referência foi alcançado por tentativas ao se alterar os parâmetros das direções *"u"* e *"v"*, até chegar um resultado visualmente aproximado da superfície externa do estádio.

Enquanto que no segundo caso, a maioria das maneiras de automatização passa por processar e combinar diferentes quantidades de diferentes elementos geométricos. Uma dessas situações acontece quando o sistema permite realizar um tipo de operação de modelagem em diversos elementos simultaneamente, uma vez que se pode selecionar múltiplos parâmetros ou elementos mediante operações de manipulação de dados. Por exemplo, no Estudo 2, na fase A da etapa 3, na qual se realizou múltiplas cópias ou rotacionou-se 54 pavimentos simultaneamente.

Outra capacidade da MP constatada é a de um maior controle das operações de modelagem para gerar uma forma, que é apoiada na associação entre diferentes elementos mediante a criação de *constraint* entre eles. Por exemplo, no Estudo 2, tem-se a articulação entre os volumes dos nove blocos com os elementos da treliça metálica, que foi demonstrada no item 5.2.6, ao se variar o ângulo de rotação dos blocos.

Ambas as características comentadas anteriormente, criam a base para a habilidade de gerar várias alternativas de projeto em menor tempo que ferramentas não paramétricas. De especial interesse para a Arquitetura, essa característica é suportada pelas variações paramétricas

criadas a cada alteração do meta-modelo (*template*) do objeto que se sendo modelando. No caso do trabalho em questão, esse recurso permite explorar diferentes configurações geométricas entre os elementos do objeto e, assim, gerar diferentes instâncias do mesmo. Como essa exploração é guiada pelo meta-modelo definido pelo usuário, o mesmo deve possuir a capacidade de determinar estrutura interna do modelo ao longo da modelagem, de modo a estabelecer os parâmetros chave e as relações paramétricas do objeto. Em outras palavras, a abrangência da capacidade de gerar famílias de formas está relacionada à habilidade do usuário em conceber e definir a meta-estrutura da forma.

Além disso, essa abrangência é delimitada pela habilidade do usuário de deduzir as características da concepção formal do seu projeto em parâmetros chave e em relações paramétricas. Ou seja, definir um procedimento para a geração da forma utilizando-se das técnicas apresentadas no item 3.2.2, sobre métodos de modelagem para geração e transformação de superfícies. Por isso, a medida que cresce o domínio do usuário desses métodos, mais amplo será a gama de formas que poderão ser produzidas. Por outro lado, se for levado em consideração um usuário com total domínio desses métodos de geração, pode-se afirmar que a ferramenta de MP possibilita a construção de uma extensa série de formas.

Mais uma característica notada é a ampliação da gama de métodos de concepção de formas disponíveis ao usuário, principalmente em relação à técnicas anteriores, como a MG e no tocante as formas cuvas. Isso pode ser percebido na fase C da etapa 3 do estudo empírico 1, na qual o GH ajusta a superfície final do estádio por *morphing*. O ponto importante não se encontra na velocidade e/ou facilidade com que a MP ajustou automaticamente o elemento padrão de fechamento a modulação da superfície do estádio, mas sim na precisão das formas criadas. Em outras palavras, se essa forma fosse modelada em MG utilizando-se, por exemplo, manipulação por formas livres, o resultado final seria uma aproximação e possivelmente conteria imprecisões. Uma vez que modelar individualmente cada módulo é um processo complexo, repetitivo e propenso a erro humano. Portanto, quando se trata de certas formas curvas irregulares, se fossem criadas por MG, ou até mesmo modelos físicos, não apenas o resultado formal seria diferente do criado por MP, mas como implicaria em um processo de modelagem diferente.

A última característica da MP observada, é a geração de resultados inesperados entre as instâncias de um modelo, que não foram previstos *à priori*. Isso pode acontecer quando o usuário não estruturou rigidamente os parâmetros (chave) de controle da forma, deixando

abertura para configurações geométricas não compatíveis com a concepção formal buscada. Um exemplo disto ocorreu no Estudo 3, quando a forma gerada pela troca do gráfico guia que determinava a sequência numérica dos fatores de escala dos pavimentos na fase C da etapa 2 (ver Quadro 21), alterou o formato primário da obra. Entretanto, é mais provável, que seja um produto da capacidade dos computadores de calcular rapidamente soluções geométricas, além da habilidade humana. Isto é, o usuário pode estabelecer parâmetros chaves menos rígidos e delegar para o computador a combinação entre eles, de modo que o usuário não pode prever todos os resultados possíveis. Um exemplo dessa situação é a aplicação da geração semi-automática de formas, comum à modelagem procedural[172] ou ao *Generative Design*[173].

Concluindo, levando-se em consideração os vários aspectos apresentados ao longo do trabalho, entende-se que as ferramentas de modelagem paramétrica possuem versatilidade de uso e potencial para explorar construções geométricas cada vez mais complexas, assim ampliando as possibilidades de concepção formal de obras arquitetônicas.

[172] Ver item 3.2.2.2.2, sobre Técnicas de Modelagem Avançadas.
[173] Ver item 2.1.5.

6 Considerações Finais

A concepção da forma de uma obra arquitetônica é parte integrante do processo de projeto e está interligada com as decisões do arquiteto sobre sua proposta. Ao longo do tempo da produção arquitetônica, as opções para essa concepção foram limitadas, em parte, pelos métodos de representação gráfica que, especialmente para as formas curvilíneas, apresentavam dificuldades para representá-las de maneira completa e precisa. Por isso, é interessante o estudo e a experimentação de novas técnicas na busca de solucionar ou minimizar essas limitações e esses problemas das técnicas tradicionais. Para um número crescente de arquitetos, principalmente a partir da década de 1990, a Modelagem Paramétrica (MP) desempenhou um papel importante nesta busca.

Por essa razão, que o presente trabalho de dissertação discutiu as potencialidades e as limitações dessa ferramenta para a concepção de formas curvas na Arquitetura. Para isso, foi necessário se embasar nos fundamentos dos novos desenvolvimentos na Geometria e nas ferramentas computacionais aplicadas ao projeto e à construção de edificações. As vantagens de utilização da MP na concepção formal arquitetônica puderem ser demonstradas a partir dos estudos empíricos, realizados no programa Rhinoceros e seu *plug-in* Grasshopper. Esses estudos permitiram concluir alguns pontos sobre a MP que serão apresentados a seguir.

6.1 Conclusões

A aplicação da modelagem paramétrica na concepção formal reforçou a diferença dos procedimentos existentes entre a modelagem geométrica (3D) com certo grau de automação e o desenho (2D). Primeiramente, na maneira de manipular e visualizar as formas. Por exemplo, as formas executadas em programas gráficos podem ser consideradas objetos editáveis, pois permitem ao projetista experimentar diferentes alterações sem inseri-lo em uma situação irreversível (FLORIO, 2005, p. 389), uma vez que sempre há opção de desfazer as últimas ações de modelagem.

Do mesmo modo, alguns métodos de concepção de formas da técnica computacional não possuem similares entre as ferramentas de desenho ou de construção de modelos físicos, o que amplia as opções destas técnicas oferecidas ao projetista. Isso pode ser percebido na construção de formas mais complexas ao se utilizar operações booleanas ou interpolando as diferentes formas mediante o *blend*, ou ainda, criar transformações em uma superfície por

pontos de controle. Devido a isso, pode-se afirmar que a ferramenta de MP possibilita a construção de uma extensa série de formas, ampliando o repertório disponível ao arquiteto.

Neste contexto, é visível a importância dos avanços nos recursos da Geometria, apresentados no Capítulo 3, uma vez que foi a codificação destes conhecimentos em técnicas de modelagem geométrica que permitiram estes novos métodos de geração de formas (HOWARD, 2006). Além disso, a definição geométrica das formas se tornou tão fundamental para sua concepção e, consequente, construção, que surgiram departamentos em escritórios de porte mundial com o objetivo de resolver esses problemas. Por exemplo, o *Specialist Modelling Group* do escritório *Foster and Partners* e o *Arup Advanced Geometry Unit* da empresa de engenharia Arup. Também, foram formados grupos de pesquisas e associações, como, *a SmartGeometry*, que organiza anualmente um congresso internacional.

Outro ponto, observado no presente trabalho, foi a diferença entre duas técnicas computacionais: a Modelagem Geométrica (MG) e a Modelagem Paramétrica. A primeira, mais antiga, representa objetos através de elementos abstratos[174], que estão isolados um dos outros. Enquanto que na segunda, mais recente e baseada na primeira, pode-se criar as associações entre esses elementos de modo a trabalhar com um conjunto deles e, até, chegando a criar comportamentos para eles.

Na MG o método mais adequado para gerar as formas curvilíneas é por formas livres, que pelo ponto de vista do usuário possui uma operacionalidade mais aproximada com os métodos gestuais, a exemplo de moldar ou esculpir um modelo físico. Neste caso, pode-se considerar uma manipulação direta da forma, no sentido que se trabalha sobre a visualização dela, utilizando-se do cursor do *mouse* como um substituto da mão do projetista, assim criando uma idéia de "contato" com a forma. Ao passo que, na MP[175] gera-se o objeto por parametrização geométrica da forma, das ações de modelagem e das relações entre os elementos do objeto. Neste caso, pode-se considerar uma manipulação indireta da forma, no sentido que se trabalha sobre os parâmetros, que, comumente, são expressos por notações (textos ou ícones). A alteração destes parâmetros pelo usuário é automaticamente realizada pelo programa, que se torna mais um "intermediário" entre a forma criada e o usuário.

Apesar de todo tipo de modelagem computacional ser uma representação matemática, a MP reforça e torna explícita essa questão ao ter uma abordagem matemática na geração de formas,

[174] Como curvas, retas, planos e etc.
[175] Levando-se em consideração os estudos empíricos realizados no presente trabalho.

no sentido de que é possível construir uma forma utilizando-se de equações matemáticas e não somente de operações de modelagem. Ao aplicar essa abordagem a concepção formal, nota-se que ela exige que as condicionantes e/ou a intenção plástica do arquiteto estejam mais definidas, comparando com o uso de croquis e esboços, tradicionalmente presentes nessa etapa. Como cada um desses dois métodos possui sua qualidade, é provável que se desenvolva uma colaboração entre eles durante a concepção formal, pois cada um pode contribuir de maneira diferente, sendo complementares entre si.

Deve-se destacar que uma grande vantagem da MP para a concepção de formas não se encontra somente em uma das capacidades descritas anteriormente, mas sim ao se combinar todas essas particularidades. Essa associação é expressa no controle e gerenciamento síncrono de todos os elementos da produção de uma configuração geométrica complexa. Essa situação envolve um pensar integrado entre diversos métodos de geração e transformação de formas, muitas vezes pouco provável de ser alcançado pelo projetista. Assim, a MP "[...] estende a capacidade humana de imaginar e de combinar grandes quantidades de dados e informações [...] deixando para o computador a tarefa de processar dados extremamente complexos" (FLÓRIO, 2012, p. 18).

Em linhas gerais, uma particularidade importante da MP é o modo de pensar a concepção formal pelo lado lógico, no qual se exige um maior raciocínio mental sobre as relações espaciais do que uma construção de um croqui, na qual predomina o gestual. No sentido que a concepção formal na MP é encarada como um problema, que deve ser decomposto em partes e organizado em uma estrutura, por regras e relações entre elas. Tal pensar é estranho a maioria dos arquitetos e pode ser um obstáculo, mas que possui o potencial de lidar com a complexidade inerente ao projeto arquitetônico.

6.2 Dificuldades

Atualmente, segundo Davis (2013), à medida que cada vez mais arquitetos entram em contato com as ferramentas de modelagem paramétrica, está crescendo uma discussão entre esses profissionais, na qual se questiona se os programas de MP disponíveis e usados em escritórios de arquitetura possuem a capacidade para acomodar certas modificações de projeto. Uma vez que muitos arquitetos enfrentam constantemente impedimentos de regeneração automática do sistema (*breaking the model*) e por isso precisam refazer todo o meta-modelo. Mas nesse caso, nem sempre há excesso de regras (*over-constraint*), mas sim, uma tentativa de alteração de uma regra de alto nível da hierarquia de organização do meta-modelo, na qual outras

relações e parâmetros se baseiam. O exemplo mais comum seria realizar transformações topológicas na geometria do modelo, como trocar a geometria do meta-modelo de hiperbólica para conóide.

Alguns autores, ainda de acordo com Davis (2013), apontam que para enfrentar esse problema os arquitetos precisam prever com certa antecedência possíveis mudanças no projeto, e assim, dar uma maior flexibilidade ao meta-modelo. Logo, reforçando que para se gerar um modelo paramétrico do projeto é necessário investir um bom tempo no planejamento dos parâmetros e das relações do meta-modelo, antes de começar à realmente construí-lo em ambiente computacional. O desafio de construir um modelo paramétrico, pois, é encontrar um conjunto de regras que é o mais simples possível, mantendo-se flexível o suficiente para acomodar possíveis casos de alterações. Desse modo, a imprevisibilidade inerente do processo de projeto se torna um paradoxo para a utilização da MP na Arquitetura.

Em resumo, uma grande dificuldade na aplicação da MP está na contradição em tentar delimitar propostas indeterminadas de projeto, principalmente considerando-se a fase de concepção formal, mediante um ferramenta baseada em funões explícitas e em pensamento algorítmico.

6.3 Recomendações

É papel da universidade introduzir novas tecnologias no ensino e na pesquisa, de maneira que os alunos estejam preparados para lidar com o aparecimento de novos recursos para as diversas etapas do projeto, nas quais o uso da tecnologia está cada vez mais presente. Assim, a capacidade de avaliar criticamente as ferramentas computacionais se torna fundamental, a medida que as opções crescem progressivamente. Igualmente, vale destacar que deve-se aprender não apenas sobre as capacidades destas tecnologias, mas também como integrá-las as demais disciplinas da grade curricular. Por outro lado, verifica-se em grande parte dos atuais currículos de cursos de graduação em Arquitetura no Brasil não é compatível com o novo complexo de habilidade e conhecimentos[176] demandado ao usuário de um programa de modelagem paramétrica. Levando-se em consideração esses aspectos, seria necessário uma adaptação curricular.

A MP mostrou-se ser uma tecnologia promissora para a concepção de formas curvilíneas, mas não se deve ser conduzido pelo fascínio sobre essas novas formas e recair sob um formalismo,

[176] Como cálculo diferencial, equações paramétricas e noções de organização de fluxo de dados, entre outros.

ou seja, um modismo de formas curvas. Mas sim, se manter alerta sobre a relação dessas formas com o material construtivo que será usado, ou seja, o caráter tectônico delas. Assim, “saber justificar, com argumentos plausíveis, a utilização destes recursos com parcimônia e sabedoria, para obter projetos e edifícios com qualidade” (FLÓRIO, 2012, p. 19), os quais empregam essas formas curvilíneas.

6.4 Desdobramentos

O tema discutido neste trabalho pode orientar novas pesquisas na área, pois todo conhecimento é passível de aprofundamento ao se inserir novos pontos de vista ou se detalhar procedimentos mais sistematizados.

Sugere-se o aprofundamento dos estudos empíricos realizados, com a substituição do programa utilizado por outros similares, como outros *plug-in* para Rhinoceros, o Paracloud ou o Generative Components da Bentley. De modo a poder delimitar quais são as especificidades das interfaces de cada programa e, assim, retirá-las da análise sobre a MP. Com isso, será possível determinar com maior precisão os princípios básicos dos procedimentos de modelagem paramétrica e ampliar o conhecimento conceitual sobre o assunto.

Estes estudos empíricos modelaram a forma de obras arquitetônicas já construídas, tendo ela sempre como referência ou gabarito, de uma maneira que pode ter limitado o processo de parametrização da forma. Esse processo pode ser definido como o estabelecimento dos parâmetros chaves que representam as principais características de geração da forma. No mesmo sentido do meta-modelo que possibilita a geração de diferentes instâncias dessa forma e por fim, a sua família. Recomenda-se explorar mais detalhadamente esses procedimentos, focando na MP como um meio de investigação da geração de formas, no qual se pode incluir as capacidades de processos gerativos e performativos, à exemplo dos *Generative Model*, *Performace Model*, das classes paradigmáticas de modelos de projetação digital definidas por Oxman (2006).

Além disso, deve-se pensar em como o produto dessa concepção formal da modelagem paramétrica será desenvolvido, durante as outras etapas do projeto até definir as informações necessárias para sua viabilização construtiva. Para tanto, indica-se aos novos trabalhos que investiguem a concepção formal de obras arquitetônicas empregando sistemas de MP que atribuam não apenas informações geométricas aos seus meta-modelos, mas também

informações físicas de materiais construtivos, de modo a simular o seu comportamento. Por exemplo, testando o conjunto de componentes personalizados do GH, chamado Kangaroo, o qual define *constraints* que simulam o comportamento de modelos físicos, como o funicular usado por Gaudí. Por outro lado, novos trabalhos podem explorar o estabelecimento de protocolos orientadores para a transferência de informações da forma criada para os sistemas de fabricação digital.

A escolha por modelar formas curvilíneas partiu da constante menção da renovação do interesse por elas pela comunidade arquitetônica em bibliografias referencias sobre MP e por fim tornou-se uma estratégia de recorte do escopo do trabalho, mas deve-se apontar que a MP também pode ser aplicada a formas poliédricas ou ortogonais. Por isso, propõe-se uma continuação deste trabalho em uma futura pesquisa que se focaria nas contribuições da MP para concepção formal arquitetônica. Para esse estudo pode-se levantar as seguintes questões:

- Analisar e comparar os processos de modelagem da MG com da MP, ao se modelar o mesmo conjunto de obras arquitetônicas nas duas técnicas, de modo a delimitar suas contribuições a concepção formal;
- Buscar desenvolver uma metodologia mais sistematizada, ao combinar procedimentos quantitativos e qualitativos, para avaliar a precisão das formas curvas criadas utilizando-se MP;
- Traçar determinantes geométricas que elucidem como as formas curvas criadas utilizando-se MP podem ser mais precisas e detalhadas do que outras técnicas computacionais e/ou outros meios de expressão e representação;

Desde o início da década de 2000, conforme Santos (2012, p. 25), a indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) demonstrou seu interesse em atualizar seu modelo de prática profissional para a Modelagem da Informação da Construção (BIM). Esse novo cenário está gerando pesquisas sobre novos métodos de trabalho, experiências práticas de sua implantação em escritórios de profissionais da área de AEC, tornando-se um dos assuntos mais pesquisados e discutidos dessa década. Assim, acredita-se que futuros trabalhos, também, devam abordar esse tema.

Por isso, propõe-se uma complementação deste trabalho em uma futura pesquisa, focando-se na integração do produto da concepção formal da MP com ferramentas BIM. Para esse estudo pode-se levantar as seguintes questões:

- Buscar definir a semântica das formas importadas, para que possam se comportar como objetos inteligentes pertencentes a área de AEC, uma vez que a concepção formal foi realizada em um programa de baixo nível de semântica, ou seja, que utiliza-se de elementos abstratos;
- Investigar como manter as relações geométricas associativas criadas nas ferramentas de MP ao inseri-las no ambiente BIM;
- Determinar quais outras particularidades das ferramentas BIM podem auxiliar na concepção formal, e
- Analisar e comparar as características específicas das ferramentas de concepção formal no ambiente BIM com as ferramentas de MP de baixo nível semântico.

6.5 Observações de fechamento sobre a pesquisa

O presente trabalho buscou investigar se os métodos e as estratégias da modelagem paramétrica poderiam contribuir para a atividade projetual arquitetônica na concepção de formas curvilíneas. Porém, ao finalizar o trabalho, pode-se notar que certas limitações o impediram de alcançar plenamente essa meta, visto que não se justificou amplamente e sistematicamente a importância da MP para concepção das formas curvas. Pode-se apontar que os três estudos empíricos não foram os exemplos mais compatíveis para demonstrar a variedade e a precisão de concepção de formas curvas da MP e como ela produz um resultado formal diferente de outras técnicas computacionais. Contudo, outras obras mais adequadas não forneciam grande disponibilidade de informação sobre elas.

Apesar disso, foi possível demonstrar diversas vantagens da utilização da MP através de uma avaliação qualitativa dos procedimentos técnicos adotados, de modo a apontar as capacidades e as limitações da aplicação da MP para a concepção formal de edificações. E confirmar que ferramentas MP possuem versatilidade de uso e potencial para explorar construções geométricas cada vez mais complexas, principalmente mediante variações paramétricas, assim ampliando as possibilidades de concepção formal de obras arquitetônicas.

Finalmente, como uma pesquisa exploratória, acredita-se que esse trabalho tenha construído uma visão geral, de tipo aproximativo, acerca das capacidades da MP e que a partir dele trabalhos futuros possam formular hipóteses mais precisas e operacionalizáveis.

Referências

AARTS, J.M. **Plane and Solid Geometry.** New York: Springer, 2008. 349 p.

ABASCAL, Eunice Helena S.; ABASCAL BILBAO, Carlos. **Arquitetura e ciência**. Topologia e intencionalidade em projeto, fronteiras. *Arquitextos*, São Paulo, 12.137, Vitruvius, out 2011.Disponível em: <http://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/12.137/4091>. Acesso em: fev. 2012.

ABEL, Chris. **Architecture, Technology and Process**. Oxford: Architectural Press, 2004.

ACHTEN, Henri H. Experimental Design Methods: a review. **International Journal Of Architectural Computing,** Liverpool, v. 7, n. 4, p. 505-534. dez. 2009.

AISH, Robert. Extensible Computational Design Tool for Exploratory Architecture. In: KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the digital age:** design and manufacturing. New York: Taylor & Francis, 2003. p. 243-252.

AISH, Robert; WOODBURY, Robert. Multi-Level Interaction in Parametric Design. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART GRAPHICS, 5., 2005, Frauenwörth Cloister. **Proceedings ....** Berlin: Springer, 2005. p. 151-162.

Allianz arena abre sus puertas al mundo. **LaRepublica.pe**, Lima, jun. 2006. Disponível em: <http://www.larepublica.pe/09-06-2006/allianz-arena-abre-sus-puertas-al-mundo>. Acesso em: out 2011.

ALMGREN, Fred J. Minimal surface forms. **The Mathematical Intelligencer,** New York, p. 164-172. dez. 1982.

ALONSO, Marina A. Alvarez; DE ISASI, Teresa Fernández-Trapa. Auditorio de Tenerife. **Informes de la construcción**. Madrid, v. 50, n. 455, p. 41-52, maio/jun. 1998.

AMORIM, Arivaldo Leão de. **Fundamentos para implementação de sistema CAD para a drenagem superficial de vias.** 1990. 271 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

AMORIM, A. L. **Notas de aula da disciplina ARQ739**. Laboratório de Projeto Auxiliado por Computador - LACAD/UFBA/PPG-AU. Salvador: UFBA, 2010.

ARNOLD WALZ ARCHITECT. 2012. Disponível em: <http://www.a-walz.eu/>. Acesso em: jul. 2012.

ARUP. 2012. Disponível em: <http://www.arup.com/Home/Projects/Yas_Hotel.aspx >. Acesso em: jul. 2012.

AYRES FILHO, Cervantes. **Acesso Ao Modelo Integrado Do Edifício**. 2009. 254 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

AZEVEDO, Eduardo; CONCI, Aura. **Computação Gráfica:** Teoria e prática. Rio de Janeiro: Campus, 2003. 322 p.

BAKER, Don. UK Garden of Eden. **Architectureweek**: design and building in depth, Eugene, [s.l.], p. D4.1- D4.2, 18 jul. 2001. Mensal. Disponível em: <http://www.architectureweek.com/2001/0718/design_4-1.html>. Acesso em: set. 2011.

BARSKY, Brian A.; DEROSE, Tony D. **Geometric Continuity of Parametric Curves.** Berkeley: University Of California, 1984. 25 p. Relatório Técnico n º UCB / CSD 84/205. Disponível em: <http://digitalassets.lib.berkeley.edu/techreports/ucb/text/CSD-84-205.pdf>.

BARTELS, Richard H.; BEATTY, John C.; BARSKY, Brian A. **An Introduction to Splines for use in Computer Graphics and Geometric Modeling.** Los Altos: Morgan Kaufmann Publishers, 1987. 476 p. Acesso em: 27 fev. 2012.

Bay Wonder: Esplanade – theatres on the bay. **Southeast Asia Building**: incorporating architecture, interior and landscaping. Cingapura, jan. 2002.

BELESKY, Philip. **Ghost in the Machines:** Parametric architecture and the philosophy of Giles Deleuze. Disponível em: <http://www.manifoldblog.com/?p=116>. Acesso em: 03 jul. 2010.

BENEVOLO, Leonardo. **A Arquitetura no Novo Milênio.** São Paulo: Estação Liberdade, 2007.

BESANT, C. B.; LUI, C.W. K. **Computer-Aided Design and Manufacture.** 3. ed. Sussex: Halsted, 1986. 410 p. (Ellis Horwood Series in mechanical engineering).

BÉZIER, Pierre. First steps of CAD. **Computer-aided Design,** Oxford, p. 259-261. jun. 1989.

BULLIVANT, Lucy. BIX Matrix: realities, united, Kunsthaus Graz, Austria. **Architectural Design**, Londres, v. 75, n. 1, p. 82-85, jan/feb. 2005.

BURROWS, Stephen et al. The Allianz Arena: A new football stadium for Munich, Germany. **The Arup Journal**, [s.l.], v. 41, n. 1, p. 24-31, jan. 2006. Disponível em: <http://www.arup.com/_assets/_download/download502.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2012.

BURRY, Jane R.; BURRY, Mark C.. **The New Mathematics of Architecture**. New York: Thames & Hudson, 2010.

BURRY, Mark. Between Intuition and Process: Parametric Design and Process. In: KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the digital age:** design and manufacturing. New York: Taylor & Francis, 2003. p. 147-162.

BURRY, Mark. Homo Faber. **Architectural Design**, Londres, v. 75, n. 4, p. 30-37, ago. 2005.

BURRY, Mark. Parametric design and the Sagrada Familia. **Architectural Research Quarterly**, Cambridge, p. 70-81. jun. 1996.

BURRY, Mark; MURRAY, Zolna. Computer Aided Architectural Design Using Parametric Variation And Associative Geometry. In: CHALLENGES OF THE FUTURE, 15., 1997, Vienna. **Proceedings ....** Vienna: Osterreichischer Kunst- Und Kulvurverlag, 1997.

Disponível em: <http://info.tuwien.ac.at/ecaade/proc/burry/default.htm>. Acesso em: maio 2011.

BURTON, David M. **The History of Mathematics:** An Introduction. Columbus: Mcgraw−Hill Primis, 2006. 790 p.

CABRINHA, Mark. From Bézier to NURBS: Integrating Material and Digital Techniques through a Plywood Shell. In: SMART ARCHITECTURE: INTEGRATION OF DIGITAL AND BUILDING TECHNOLOGIES, 25., 2005, Savannah. **Proceedings ....** Savannah: Acaadia, 2005. p. 156-169. Disponível em: <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?acadia05_156>. Acesso em: 29 mar. 2011.

CARDOSO, Christina Araujo Paim. **Formas Arquitetônicas:** POSSIBILIDADES EM AMBIENTE COMPUTACIONAL. 2005. 228 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Ufba, Salvador, 2005.

CARPO, Mario. **The Alphabet and the Algorithm.** Londres: Mit Press, 2011.

CATTERMOLE, Paul (Ed.). **Architectural Excellence**: 500 iconic buildings. Ontario: Firefly Books, 2008.

CECCATO, Cristiano. The Architect as Toolmaker: Computer-Based Generative Design Tools and Methods. In: CONFERENCE ON COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA, 4., 1999, Xangai. **Proceedings ...** Xangai: Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1999. p. 295-304.

CELANI, Gabriela. **Beyond analisys and representation in CAD:** a new computational approach to design education. 2002. 202 f. Tese (Doutorado) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Estados Unidos, 2002.

CELANI, M. G. C.; CYPRIANO, D.; GODOI, G.; VAZ, C. E. V. A gramática da forma como metodologia de análise e síntese em arquitetura. **Conexão - Comunicação e Cultura**, Caxias do Sul, v. 5, p. 15-20, 2007.

CELANI, M. G. C.; LAZARINI, Kaya. Using CAD for generating architectural form: Reviewing and translating pioneer programs. In: MATHEMATICS & DESIGN. INTERNATIONAL CONFERENCE, 5., 2007, Blumenau. **Proceedings …** 2007.

CEREZO, Eva; PINA, Alfredo; SERÓN, Francisco J.. Motion and behaviour modelling: state of art and new trends. **The Visual Computer,** Berlin, p. 124-146. maio 1999. Disponível em: <http://giga.cps.unizar.es/viejo/download/90150124.pdf>. Acesso em: jul. 2012.

CHAVARRO, Oscar Xavier. **COMPUTER GRAPHICS TIMELINE.** Computer Graphics Course Class Material. Disponível em: <http://sophia.javeriana.edu.co/~ochavarr/computer_graphics_history/historia/>. Acesso em: mar. 2011.

CHIARELLA, Mauro. GEOMETRY AND ARCHITECTURE: NURBS, Design and Construction. In: ICMD, 4., 2004, Argentina. **Proceedings of the Fourth International Conference of Mathematics & Design.** Argentina: Icmd, 2004. p. 135-139. Disponível em: <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?0131>. Acesso em: set. 2009.

CHING, Juroszok. **Representação gráfica para desenho e projeto**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2010.

CHOI, B. K.; LEE, C. S. Sweep surfaces modelling via coordinate transformations and blending. **Computer-aided Design,** Newton, p. 87-96. mar. 1990.

CLARK, Ed; GILPIN, David. Selfridges, Birmingham. **The Arup Journal,** [S.l.], p. 3-10. jan. 2005. Disponível em: <http://www.formpig.com/pdf/formpig_ARUP%20selfridges_future%20systems.pdf>. Acesso em: 14 set. 2011.

CLARK, Roger H.; PAUSE, Michael. **Precedents in Architecture:** Analytic Diagrams, Formative Ideas, and Partis. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

COLLETTE, Jean-Paul. **Historia de las matematicas II**. México: Siglo XXI Editores, 1985. 324p.

CONSIGLIERI, Victor. **A Morfologia da Arquitectura:** 1920-1970. Lisboa: Editorial Estampa, 1995. 2 v.

COOK, Mike; PALMER, Angus; SISCHKA, Johan. SAGE Music Centre, Gateshead: Design and construction of the roof structure. **The Structural Engineer**, Londres, v. 84, n. 10, p. 23-29, 16 maio 2006. Mensal. Disponível em: <http://www.istructe.org/webtest/files/fe/fe4dd710-c85c-44c3-898e-ab8cf02e5e7a.pdf>. Acesso em: jul. 2012.

COOLIDGE, Julian Lowell. **A History of Geometrical Methods.** Oxford: The Clarendon, 1940. 451 p.

COONS, Steven Anson. An outline of the requirements for a computer-aided design system. In: SPRING JOINT COMPUTER CONFERENCE, 2., 1963, New York. **Proceedings ....** New York: Acm, 1963. p. 299-304.

COXETER, Harold Scott Macdonald; GREITZER, Samuel L. **Geometry Revisited.** Washington: The Mathematical Association Of America, 1967. 193 p.

CUSATIS JUNIOR, Affonso de. **Raycasting Intervalar de Superfícies Implícitas com Aritmética Afim.** 1999. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

DAHAN-DALMEDICO, Amy. Mathematics and the Sensible World: Representing, Constructing, Simulating. **Architectural Design**, Londres, v. 81, n. 4, p. 18-27, 26 jul. 2011.

DAVIS, Daniel. **Modelled on Software Engineering:** Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture. 2013. 234 f. Tese (Doutorado) - Curso de School Of Architecture And Design, Departamento de College Of Design And Social Context, Royal Melbourne Institute Of Technology, Melbourne, 2013. Disponível em: <http://www.danieldavis.com/thesis/>. Acesso em: 30 set. 2013.

DAVIS, Daniel; BURRY, Jane; BURRY, Mark. Understanding visual scripts: Improving collaboration through modular programming. **International Journal Of Architectural**

Computing, Liverpool, p. 361-376. 3 fev. 2012. Disponível em: <http://www.nzarchitecture.com/image/03_davis.pdf>. Acesso em: jul. 2012.

DAWKINS, Paul. **Parametric Equations and Curves.** Notas de aula. Disponível em: <http://tutorial.math.lamar.edu/Classes/CalcII/ParametricEqn.aspx>. Acesso em: mar. 2012.

DESIGNTOPRODUCTION. 2012. Disponível em: <http://www.designtoproduction.ch>. Acesso em: jul. 2012

DZ BANK BUILDING. **El Croquis**: Frank Gehry 1996-2003, Madrid, n. 117, p.114-131, 2003. Bimestral.

EASTMAN, Charles M. The Evolution of Computer Models in Building. In: _____. **Building Product Models:** Computer Environments, Supporting Design and Construction. Boca Raton: CRC Press, 1999. p. 35-74. Disponível em: <http://dcom.arch.gatech.edu/class/COA8672/Readings/history/CHAPTERTWOffi1.pdf>. Acesso em: maio 2012.

EASTMAN, Charles M. Why Are We Here and Where We are Going: The Evolution of CAD. In: NEW IDEAS AND DIRECTIONS FOR THE 1990'S, 1, 1989, Gainsville. ACADIA Conference Proceedings. Gainsville: Acadia, 1989. p. 9-26. Disponível em: <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?0642>. Acesso em: mar. 2011.

EASTMAN, Chuck *et al*. **BIM Handbook:** A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 648 p.

EDLER, Jan. Communicative Display Skin for Buildings: Bix at the Kunsthaus Graz. In: KOLAREVIC, Branko; MALKAWI, Ali M. (Ed.). **Performative Architecture:** Beyond instrumentality. New York: Spon Press, 2005. p. 149-160.

EMMER, Michele. Mathland: The Role of Mathematics in Virtual Architecture. **Nexus Network Journal,** Torino, p. 73-88. 13 nov. 2005.

EVES, Howard. **An Introduction to the History of Mathematics.** 3. ed. Austin: Holt, Rinehart And Winston, 1969. 464 p.

EYLON, Lili. Calatrava Wave in Tenerife. **Architectureweek**: design and building in depth, Eugene, [s.l.], p.B.1.1-B.1.2, 3 set. 2003. Mensal. Disponível em: <http://www.architectureweek.com/2003/0903/building_1-1.html>. Acesso em: set. 2011.

FARIN, Gerald. **Curves and Surfaces for CAGD:** A Practical Guide. 5. ed. San Diego: Academic Press, 2002. 520 p.

FARIN, Gerald; HOSCHEK, J.; KIM, M.-S. **Handbook of Computer Aided Geometric Design.** Amsterdã: North Holland, 2002. 848 p.

FAUX, I. D.; PRATT, Michael J. **Computational Geometry for Design and Manufacture.** Sussex: Ellis Horwood, 1979. 331 p. (Mathematics & Its Applications).

FISCHER, Joachim. **1000X european architecture.** Salenstein: Braun, 2007.

FISHER, John; LOWTHER, John; SHENE, Chingkuang. Curve and Surface Interpolation and Approximation: Knowledge Unit and Software Tool. In: ANNUAL CONFERENCE ON INNOVATION AND TECHNOLOGY IN COMPUTER SCIENCE EDUCATION, 9., 2004, Leeds. **Proceedings …** New York: ACM, 2004. p. 146-150. Disponível em: <http://www.cs.mtu.edu/~shene/PUBLICATIONS/2004/ia.pdf>. Acesso em: fev. 2012.

FLORIO, Wilson. **O Uso de Ferramentas de Modelagem Vetorial na Concepção de uma Arquitetura de Formas Complexas**. 2005. 477 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2005.

FLORIO, Wilson. Arte, Complexidade e a Estética Digital na Arquitetura Contemporânea. In: **Congresso internacional em artes, novas tecnologias e comunicação**: ontem, hoje e amanhã - pluralidade de olhares em um percurso comum / organização Paulo Cezar Barbosa Mello. São Paulo: Museu de Arte Contemporânea – USP, 2008. p. 185-192.

FLORIO, Wilson. Modelagem Paramétrica no Processo de Projeto em Arquitetura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2009, São Carlos. **Anais....** São Carlos: Rima Editora, 2009. p. 571-582.

FLORIO, Wilson . Notas sobre pensamento e cognição em projetos paramétricos. In: **II Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo**. Teorias e práticas na Arquitetura e na Cidade Contemporâneas. Natal: PPGAU UFRN / ANPARQ, 2012. p. 1-20.

FOLEY, James D. *et al*. **Computer Graphics:** principles and practice. Boston: Addison-wesley Publishing, 1990. 1174 p. (Systems Programming Series).

FONDAZIONE RENZO PIANO. 2012. Disponível em: <http://rpf.ice.spill.net/> Acesso em: jul. 2012.

FONTANA, Jacopo della. Architettura in Vetrina: P&C Department Store, Cologne. **International Magazine of Architecture, Design, and Visual Communication**. Milano, n. 225, p. 35-42, Maio 2007. Mensal. Disponível em: <http://www.arcadata.com/WEB/pdf/225/034_043.PDF>. Acesso em: jul. 2012.

FOSTER AND PARTNERS. Modeling the Swiss Re Tower. **Architectureweek**: design and building in depth, Eugene, n. 238, p.t1.1-t1.2, 4 maio 2005. Design Tools. Disponível em: <http://www.architectureweek.com/2005/0504/tools_1-1.html>. Acesso em: ago. 2011.

FRANK GEHRY 1996-2003. Madrid: El Croquis, 2003. Bimestral. n. 117.

FRANKEN, Bernard. Real as data. In: KOLAREVIC, Branko (Ed.). **Architecture in the digital age:** design and manufacturing. New York: Taylor & Francis, 2003. p. 121-138.

FRAZER, John *et al*. Generative and evolutionary techniques for building envelope design. In: INTERNATIONAL GENERATIVE ART CONFERENCE GA2002, 5., 2002, Milão. **Proceedings ....** Milão: Ga2002, 2002. p. 301 - 316. Disponível em: <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?ga0202>. Acesso em: out. 2010.

FRAZER, John. **Computing Without Computers**. In: The 1970s is Here and Now, Architectural Design, Londres, p. 34-43. jul. 2005.

GIL, Antonio Carlos. DELINEAMENTO DA PESQUISA. In: _____. **METODOS E TECNICAS DE PESQUISA SOCIAL.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999. p. 64-74.

GIRALT-MIRACLE, Daniel (Org.). **Gaudí. La búsqueda de la forma:**Espacio, geometría, estructura y construcción. Barcelona: Lunwerg Editores, 2002.

GLYMPH, Jim. Evolution of the Digital Design Process. In: KOLAREVIC, Branko (Ed.). **Architecture in the digital age:** design and manufacturing. New York: Taylor & Francis, 2003. p. 101-120.

GOMES, Jonas M.; VELHO, Luis C. **Conceitos Básicos de Computação Gráfica.** São Paulo: Ime-Usp, 1990. 328 p.

GOMES, Jonas. et al. **Warping and Morphing of Graphical Objects**. São Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1999. 528 p.

GOMES, Jonas; VELHO, Luiz. **Fundamentos da Computação Gráfica.** Rio de Janeiro: IMPA, 2008. 603 p. (Computação e Matemática).

GORODSKI, Claudio. Alguns Aspectos do Desenvolvimento da Geometria. **Humboldtbrasil**, São Paulo, n. 2, p. 61-77, 2002.

GROBMAN, Yasha Jacob; YEZIORO, Abraham; CAPELUTO, Isaac Guedi. Computer-Based Form Generation in Architectural Design: a Critical Review. **International Journal of Architectural Computing,** Liverpool, v. 7, n. 4, p. 535-554. dez. 2009.

GROSS, Mark D. Relational Modeling: A Basis for Computer-Assisted Design. In: MCCULLOUGH, Malcolm; MITCHELL, William J.; PURCELL, Patrick (Ed.). **The Electronic Design Studio**: Architectural Knowledge and Media in the computer era. Cambridge, Londres: Mit Press, 1990. p. 123-136.

GU, Ning; SINGH, Vishal; MERRICK, Kathryn. A Framework to Integrate Generative Design Techniques for Enhancing Design Automation. In: International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia, 15., 2010, Hong Kong. **Proceedings of the 15th CAADRIA**. Hong Kong: Caadria, 2010. p. 127-136. Disponível em: <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?caadria2010_012>. Acesso em: jul. 2011.

HAYCOCK, Lorne**. Digital Mediation.** 1 v. Monografia (Bacharel) - Curso de Arquitetura, Dundee University, Dundee, 2002. Disponível em: <http://www.haycock.fsbusiness.co.uk/disswhole.htm>. Acesso em: abr. 2005.

HAYMAKER, John, FISCHER, Martin. **Challenges and Benefits of 4D Modeling on the Walt Disney Concert Hall Project** . CIFE Working Paper #64. Standford University. January, 2001. Disponível em: <http://www.stanford.edu/group/CIFE/online.publications/WP064.pdf>. Acesso em: set. 2011.

HENDERSON, Harry. **Encyclopedia of Computer science and technology.** 2. ed. New York: Facts On File, 2009.

HENSEL, Michael; MENGES, Achim. **Techniques and Technologies in Morphogenetic Design**. Architectural Design, v. 76, n. 2, 2006, Londres: Academy Press, 128 p.

HERITAGE EXPLORER: Images for Learning. 2012. National Monuments Record. Disponível em: <http://www.heritage-explorer.co.uk/>. Acesso em: jul. 2012.

HERNANDEZ, Carlos Roberto Barrios. **Design procedures:** a computational framework for parametric design and complex shapes in architecture. 2006. 196 f. Tese (Doutorado) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2006. (b).

HERNANDEZ, Carlos Roberto Barrios. Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. **Design Studies,** Grã Bretanha, v. 27, n. 3, p. 309-324. mai. 2006. (a).

HILBERT, David; COHN-VOSSEN, S.. **Geometry and the Imagination.** 2. ed. New York: Chelsea Publishing Company, 1990. 357 p.

HOFFMANN, Christoph M.; JOAN-ARINYO, Robert. Parametric Modeling. In: FARIN, Gerald; HOSCHEK, Josef; KIM, Myung-soo. **Handbook of Computer Aided Geometric Design.** Amsterdã: North Holland, 2002. p. 519-541.

HOLME, Audun. **Geometry:** Our Cultural Heritage. Berlin: Springer, 2002. 378 p.

HOWARD, Rob. CAD curved surfaces and building quality. **Information Technology In Construction**, p. 427-435. jun. 2006. Disponível em: <http://www.itcon.org/2006/31>. Acesso em: abr. 2011

HYATT, Peter; HYATT, Jenny. **Designing with Glass**: Great Glass Buildings. Victoria: Images Publishing Dist A/C, 2006.

IWAMOTO, Lisa. **Digital Fabrications:** Architectural and Material Techniques. New York: Priceton Architectural Press, 2009. 144 p. (Architecture Briefs).

JENCKS, Charles. **The Iconic Building**. New York: Rizzoli, 2005.

JENCKS, Charles. **The New Paradigm in Architecture**: The Language of Post-Modernism. New Haven, Londres: Yale University Press, 2002. 279 p.

JESKA, Simone. **Transparent Plastics**: Design and Technology. Berlin: Birkhäuser, 2008.

JODIDIO, Philip. **Architecture Now! v. 3.** Klön: Taschen, 2005.

KALAY, Yehuda E. **Architecture's New Media:** Principles, Theories and Methods of Computer-Aided Design. Cambridge, Londres: Mit Press, 2004. 536 p.

KALAY, Yehuda E. The Future of Caad: From Computer-Aided Design to Computer-Aided Collaboration. In: CONFERENCIA VENEZOLANA SOBRE APLICACIÓN DE COMPUTADORES EN ARQUITECTURA, 1., 1999, Caracas. **Proceedings ....** Caracas, 1999. p. 19-28. Disponível em: <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?ecb2>. Acesso em: mar. 2011.

KATZ, Neil C. **Parametric Modeling in AutoCAD.** AECbytes Viewpoints n. 32, 16 de maio de 2007. Disponível em: <http://www.aecbytes.com/viewpoint/2007/issue_32.html>. Acesso em: fev. 2011.

KHABAZI, Zubin. **Generative Algorithms:** using Grasshopper. Online: Grasshopper Website, 2009. Disponível em: <http://www.grasshopper3d.com/>. Acesso em: jan. 2011.

KHEMLANI, Lachmi. **SmartGeometry 2009 Conference Day.** AECbytes Feature, 10 abr. 2009. Disponível em: <http://www.aecbytes.com/feature/2009/SmartGeometry2009.html>. Acesso em: out. 2011.

KLAWONN, Frank. **Introduction to Computer Graphics:** Using Java 2D and 3D. Londres: Springer-verlag, 2008. 283 p.

KLINE, Morris. **Mathematical Thought from Ancient to Modem Times.** Oxford; New York: Oxford University Press, 1990. 436 p. v. 3.

KLOFT, Harald. Non-Standard Structural Design for Non-Standard Architecture. In: KOLAREVIC, Branko; MALKAWI, Ali M. (Ed.). **Performative Architecture:** Beyond instrumentality. New York: Spon Press, 2005. p. 135-148.

KNEBEL, K.; SANCHEZ-ALVAREZ, J.; ZIMMERMANN, S.. The structural making of the Eden Domes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE STRUCTURES, 5., 2002, Surrey. **Proceedings ....** Surrey: Thomas Telford, 2002. p. 245-254. Disponível em: <http://www.solaripedia.com/files/260.pdf >. Acesso em: set. 2011.

KNIPPERS, Jan; HELBIG, Thorsten. Recent Developments in the Design of Glazed Grid Shells. **International Journal of Space Structures**. [S.l.], v. 24, n. 2, p. 111-126, jun. 2009. Disponível em <http://www.candidejournal.net/wp-content/uploads/downloads/2011/05/CAN01_Encounters_WalzKilian.pdf>. Acesso em: jul. 2012.

KOLAREVIC, Branko (Ed.). **Architecture in the digital age:** design and manufacturing. New York: Taylor & Francis, 2003. 314 p.

KOLAREVIC, Branko. COMPUTING THE PERFORMATIVE. In: KOLAREVIC, Branko; MALKAWI, Ali M. (Ed.). **Performative Architecture:** Beyond instrumentality. New York: Spon Press, 2005. p. 193-202.

KOLMOGOROV, Andrei Nikolaevich; IUSHKEVICH, Adolʹf Pavlovich. **Mathematics of the 19th Century:** Function Theory According to Chebyshev, Ordinary Differential Equations, Calculus of Variations, Theory of Finite Differences. Berlin: Birkhäuser, 1998. 353 p.

KONE CORPORATION. **Buildings:** KONE BOOK OF SOLUTIONS. Helsinki: Lönnberg Print & Promo, 2006.

KRIPAC, Jiri. A mechanism for persistently naming topological entities in history-based parametric solid models. In: ACM SYMPOSIUM ON SOLID MODELING AND APPLICATIONS, 3., 1995, Salt Lake City. **Proceedings ....** New York: ACM, 1995. p. 21-30.

LAWSON, Bryan. CAD in architecture: the story so far. **Revista Graf&tec**, São Paulo, v. 2, n. 6, p. 31-59, dez. 1999. Semestral.

LAWSON, Bryan. Towards a computer-aided architectural design process: a journey of several mirages. **Computers in Industry,** Oxford, p. 47-57. fev. 1998.

LEAL, Ubiratan. PRESSÃO CONTROLADA. **Revista AU**, São Paulo, v. 146, 31 jun. 2006. Disponível em: <http://www.revistaau.com.br/arquitetura-urbanismo/146/imprime22178.asp>. Acesso em: out 2011.

LEE, Ghang; SACKS, Rafael; EASTMAN, Charles M. Specifying parametric building object behavior (BOB) for a building information modeling system. **Automation in Construction,** Oxford, v. 15, n. 6, p. 758-776. nov. 2006.

LEE, John M. **Introduction to Topological Manifolds.** New York: Springer, 2000. 400 p.

LEIVAS, José Carlos Pinto. Organizando o Espaço Geométrico por Caminhos Topológicos. **Vidya**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 59-71, dez. 2008. Disponível em: <http://sites.unifra.br/Portals/35/Artigos/2008/Sem_2/Organizando.pdf>. Acesso em: 10 maio 2012.

LEVETE, Amanda; KAPLICKÝ, Jan. Volume autônomo em forma de periscópio abriga centro de imprensa: paisagem e tecnologia, as inspirações do Future Systems. **Projeto Design**, São Paulo, n. 242, p.78-83, abril 2000. Mensal.

LIGHT, Robert; GOSSARD, David. Modification of geometric models through variational geometry. **Computer-Aided Design**, Oxford, v. 14, n. 4, p. 209-214. jul. 1982.

LIN, Valerie C. L.; GOSSARD, David C.; LIGHT, Richard A. Variational geometry in computer-aided design. **Acm Siggraph Computer Graphics**, Seattle, v. 15, n. 3, p. 171-177, ago. 1981.

LINDSEY, Bruce. **Digital Gehry:** Material Resistance, Digital Construction. Berlin: Birkhäuser, 2001. 96 p. (The Information Technology Revolution in Architecture).

LYNN, Greg. **Animate Form.** New York: Princeton Architectural Press, 1999. 204 p.

MADKOUR, Yehia; NEUMANN, Oliver; ERHAN, Halil. Programmatic Formation: ractical Applications of Parametric Design. **International Journal Of Architectural Computing,** Liverpool, p. 587-603. dez. 2009.

MAHFUZ, Edson da Cunha. **Reflexões sobre a construção da forma pertinente**. *Arquitextos*, São Paulo, 045.02, Vitruvius, fev. 2004 <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/04.045/606 >. Acesso em: jan. 2012.

MALEKI, Maryam M; WOODBURY, Robert F. PROGRAMMING IN THE MODEL: Combining task and tool in computer-aided design. In: Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, 15., 2010, Hong Kong. **Proceedings ....** Hong Kong: Caadria, 2010. p. 117-125.

MARAR, Ton . **Aspectos topológicos na arte concreta**. In: Segunda Bienal de Matemática da Sociedade Brasileira de Matemática, 2004, Salvador. Segunda Bienal de Matemática, SBM. Salvador : SBM, 2004. v. 1. p. 1-10

MARSH, Duncan. **Applied Geometry for Computer Graphics and CAD.** 6. ed. Londres: Springer-Verlag, 2005. 350 p.

MAYER, Rosirene. **A linguagem de Oscar Niemeyer.** 2003. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MCCULLOUGH, Malcolm. 20 Years of Scripted Space. **Programming Cultures**: Architectural Design, [S.l.] , v. 76, n. 4, p. 12-15, ago. 2006.

METZ, Tracy. Herzog & de Meuron's cushiony chameleon glows with rival teams' colors. Architectural Record: Projects- Building Types Study. Jun. 2006. Disponível em: < http://archrecord.construction.com/projects/bts/archives/stadiums/06_allianz/overview.asp >. Acesso em: out. 2011.

MITCHELL, Willam J.. **The Logic of Architecture:** Design, Computation, and Cognition. Cambridge: MIT Press, 1990. 292 p.

MITCHELL, Willam J.; MCCULLOUGH, Malcolm. **Digital Design Media:** a handbook for architects & design professionals. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1991. 439 p.

MITCHELL, William J. Afterword: The Design Studio of the Future. In: MCCULLOUGH, Malcolm; MITCHELL, William J.; PURCELL, Patrick (Ed.). **The Electronic Design Studio**: Architectural Knowledge and Media in the computer era. Cambridge, Londres: Mit Press, 1990. p. 479-493.

MITCHELL, William J. **Computer-Aided Architectural Design.** Nova Iorque: Petrocelli / Charter, 1977. 573 p.

MITCHELL, William J. FROM SKETCHPAD TO CITY OF BITS: A Story of Shifting Intentions. In: International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia, 11., 2006, Kumamoto. **Proceedings...** Kumamoto: Kumamoto University, 2006. p. 1 - 5. Disponível em: <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?_id=caadria2006_001&sort=DEFAULT&search=FROM%20SKETCHPAD&hits=3806>. Acesso em: mar. 2011.

MITCHELMORE, Michael C. The role of abstraction and generalization in the development of mathematical knowledge. In: Southeast Asian Conference on Mathematics Education, 9., 2002, Cingapura. **Proceedings of ninth SEACME.** Cingapura: Seacme, 2002. p. 157-167.

MONEDERO, Javier. Parametric design: a review and some experiences. **Automation in Construction,** Oxford, v. 9, n. 4, p. 369-377. jul. 2000.

MORTENSON, Michael E. **Geometric Modeling.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997. 523 p.

MUNRO, Dominic. Swiss Re's Building: London. **Nyheter Om Stålbyggnad**: STÅL BYGGNADSPROJEKT, Oslo, v. 16, n. 3, p. 36-43, 2004. Disponível em:

<http://www.epab.bme.hu/oktatas/2009-2010-2/v-CA-B-Ms/FreeForm/Examples/SwissRe.pdf>. Acesso em: jun. 2012.

NATIONALE-NEDERLANDEN OFFICE BUILDING IN PRAGUE. **El Croquis**: Frank Gehry 1996-2003, Madrid, n. 117, p. 88-97, 2003. Bimestral.

NATIVIDADE, Verônica Gomes. **Fraturas Metodológicas nas Arquiteturas Digitais**. 2010. 302 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NICOTRA, Filippo. Future Systems: Selfridges Birmingham. **Estratto da Materia**, Milão, n. 43, p. 64-72, 20 set. 2007. Trimestral. Disponível em: <http://immagini.archinfo.it/vedimmagine.php?data=2&_obj=38578&PHPSESSID=744e6f4cd9a7d1ae142cf85adb59e47d>. Acesso em: jul. 2012.

NOVAK, Marcos. Computational Composition in Architecture. In: COMPUTING IN DESIGN EDUCATION, 1988, Michigan. **ACADIA Conference Proceedings.** Michigan: Acadia, 1988. p. 5-30. Disponível em: <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?_id=cb88&sort=DEFAULT&search=novak&hits=7>. Acesso em: mar. 2011.

O'CONNOR, J. J; ROBERTSON, E. F. **Johann Benedict Listing.** Disponível em: <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Listing.html>. Acesso em: fev. 2012.

ORCIUOLI, Affonso; MASSAD, Fredy; YESTE, Alicia Guerrero. Gêiser Policromo. **Revista Au**, São Paulo, v. 21, n. 143, p. 52-59, fev. 2006. Mensal.

OSMAN, Yasser. The Use of Tools in the Creation of Form: Frank (L. Wright & O. Gehry). In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE, 21., 2001, Buffalo. **Proceedings ....** Buffalo: Acaadia, 2001. p. 44 - 51. Disponível em: <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?9e31>. Acesso em: ago. 2011.

OXMAN, Rivka. Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. **Design Studies**, [S.l.] , v. 29, n. 2, p. 99-120, mar. 2008.

OXMAN, Rivka. Performance-based Design: Current Practices and Research Issues. **International Journal of Architectural Computing**, Essex, p. 1-17. jan. 2008.

OXMAN, Rivka. Theory and design in the first digital age. **Design Studies,** [S.l.], p. 229-265. maio 2006. Disponível em: <http://www.technion.ac.il/~rivkao/topics/publications/Oxman_2006_Design-Studies.pdf>. Acesso em: jun. 2009.

PANCHUK, Neal. **An Exploration into Biomimicry and its Application in Digital & Parametric [Architectural] Design.** 2006. 181 f. Dissertação (Mestrado) - University of Waterloo, Waterloo, 2006. Disponível em: <etd.uwaterloo.ca/etd/ntpanchu2006.pdf>. Acesso em: jun. 2011.

PARENT, Rick. **Computer Animation:** Algorithms and Techniques. 2. ed. Burlington: Morgan Kaufmann, 2008. 624 p.

PARK, Jin-ho. Early Shape Morphing: the Metamorphosis of Polygons in Antoni Gaudi's Sagrada Familia Cathedral and Le Corbusier's Firminy Chapel. **Journal of Asian Architecture And Building Engineering,** Tóquio, p. 25-30. maio 2005. Disponível em: <http://www.jstage.jst.go.jp/article/jaabe/4/1/4_25/_article>. Acesso em: abr. 2011.

PICON, Antoine. Architecture and Mathematics: Between Hubris and Restraint. **Architectural Design**, Londres, v. 81, n. 4, p. 28-35, 26 jul. 2011.

PICON, Antoine. **Digital Culture in Architecture.** Basel: Birkhäuser Architecture, 2010. 224 p.

PIEGL, Les. On NURBS: a Survey. **Ieee Computer Graphics And Applications**, Los Alamitos, v. 11, n. 1, p. 55-71. jan. 1991. Disponível em: <http://fab.cba.mit.edu/classes/S62.12/docs/Piegl_NURBS.pdf>. Acesso em: mar. 2012.

POTTMANN, Helmut. Architectural Geometry as Design Knowledge. **Architectural Design**, v. 80, n. 4, p. 72-77, 08 jul. 2010.

PRUSINKIEWICZ, Przemyslaw; LINDENMAYER, Aristid. **The Algorithmic Beauty of Plants.** New York: Springer-verlag, 1996. 228 p.

PUPO, Regiane Trevisan. **Inserção da Prototipagem e Fabricação Digitais no Processo de Projeto:** um novo desafio para o ensino de arquitetura. 2009. 240 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

PUTNOKI, José Carlos. **Elementos de Geometria & Desenho Geométrico**. São Paulo: Scipione, 1993. 192 p.

RABELLO, Paulo Sérgio Brunner. **Geometria Descritiva Aplicada aos Sólidos Geométricos.** Rio de Janeiro: Instituto de Matemática e Estatística, 2011. 122 p. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

RAGHEB, J. Fiona (Ed.). **Frank Gehry, Architect.** New York: Guggenheim Museum Publications, 2001.

REBELLO, Yopanan C. P. **A Concepção Estrutural e a Arquitetura.** São Paulo: Zigurate Editora, 2000.

RÊGO, Rejane de Moraes. **Arquitetura e Tecnologias Computacionais**: novos instrumentos mediadores e as possibilidades de mudanças no processo projetual. 2000. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2000.

RÊGO, Rejane de Moraes. **Educação Gráfica para o Processo Criativo Projetual Arquitetônico:** as relações entre a capacidade visiográfica-tridimensional e a utilização de instrumentos gráficos digitais para a modelagem geométrica. 2008. 320 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

ROCHA, Isabel A. Medero. **Programa e Projeto na Era Digital:** O ensino de projeto de Arquitetura em ambientes virtuais interativos. 2009. 340 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RODRIGUES, Álvaro José. **Geometria Descritiva:** Projetividades, Curvas e Superfícies. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1969. 425 p.

ROGERS, David F. **An Introduction to NURBS:** With Historical Perspective. São Diego: Academic Press, 2001. 324 p.

ROSA, Joseph. **Next Generation Architecture:** Folds, Blobs, and Boxes. New York: Rizzoli, 2003. 240 p.

ROSSO, Silvana Maria. BIM: Quem é quem. **Revista AU**, São Paulo, v. 26, n. 208, p. 61-64, jul. 2011. Mensal.

SACKS, Rafael; EASTMAN, Charles M.; LEE, Ghang. Parametric 3D modeling in building construction with examples from precast concrete. **Automation in Construction,** Oxford, v. 13, n. 3, p. 291-312. maio 2004.

SALOMON, David. **Curves and Surfaces for Computer Graphics**. New York: Springer, 2006. 460 p.

SANTIAGO CALATRAVA. 2012. Disponível em : < http://www.calatrava.com/> Acesso em: 17 jul. 2012.

SANTOS, Taís de Souza; AMORIM, Arivaldo Leão de. O Tour Virtual na Documentação do Patrimônio. In: **Seminário Nacional Documentação do Patrimônio Arquitetônico com o Uso de Tecnologias Digitais**, 2010, Salvador. Anais do Seminário Nacional Documentação do Patrimônio Arquitetônico com o Uso de Tecnologias Digitais - ARQ.DOC. Salvador: FAUUFBA, 2010. CD-ROM.

SANTOS, E. T. BIM Building Information Modeling: um salto para a modernidade na Tecnologia da Informação aplicada à Construção Civil. In: PRATINI, Edison Ferreira; SILVA Jr., Eleudo Esteves de Araujo (Org.). Criação, representação e visualização digitais: tecnologias digitais de criação, representação e visualização no processo de projeto. Brasilia: Faculdade de Tecnologia da UNB, 2012, p. 25-62.

SARGENT, Anthony. The Sage Gateshead by Norman Foster. **Architectureweek**: design and building in depth, Eugene, n. 534, p.d1-d1.1, 28 set. 2011. Disponível em: <http://www.archweek.com/2011/0928/index.html>. Acesso em: out. 2011.

SAXENA, Anupam; SAHAY, Birendra. **Computer Aided Engineering Design.** New York: Springer, 2005. 426 p.

SCHEER, Sérgio; AYRES FILHO, Cervantes Gonçalves. Abordando a BIM em níveis de modelagem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1., 2009, São Carlos. **Anais do SBQP 2009.** São Carlos: Rima Editora, 2009. p. 591-601. Disponível em: <http://www.arquitetura.eesc.usp.br/ocs/index.php/SBQP2009/SBQP2009/schedConf/presentations>. Acesso em: abr. 2011.

SCHEURER, Fabian. Materialising Complexity. **Architectural Design**, Londres, v. 80, n. 4, p. 86-93, jul/ago. 2010.

SCHEURER, Fabian; STEHLING, Hanno. Lost in Parameter Space? **Architectural Design**, Londres, v. 81, n. 4, p. 70-79, jul. 2011.

SCHMAL, Peter Cachola (Ed.). **Digital Real ¦ Blobmeister:** first built projects. Basel: Birkhäuser, 2001.

SCHODEK, Daniel et al. **Digital Design and Manufacturing:** CAD/CAM applications in architecture and Design. New Jersey: Wiley, 2005. 369 p.

SCHUMACHER, Patrik. Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design. **AD Architectural Design**, v. 79, n. 4, p. 14-23, jul/ago. 2009.

SEDERBERG, Thomas W. **Computer Aided Geometric Design Course Notes.** 2011. Site da disciplina, Brigham Young University. Disponível em: <http://cagd.cs.byu.edu/~557/text/cagd.pdf>. Acesso em: fev. 2012.

SHAH, Jami J.; MÄNTYLÄ, Martti. **Parametric and Feture based CAD/CAM:** concepts, techniques and applications. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995. 619p. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=8W0E9eK2raMC&printsec=frontcover&dq=Parametric+and+Feature+based+CAD/CAM&source=bl&ots=bbmr6U1hZt&sig=rKnIoNaya2Eu6DNZa4BmCY4je8w&hl=en&sa=X&ei=yw4AULTWGfGQ0QHAh8GyBw&ved=0CD0Q6AEwAA#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: jun. 2012.

SHAPIRO, Vadim; VOSSLER, Donald L. What is a parametric family of solids? In: Acm Symposium on Solid Modeling and Applications, 3., 1995, Salt Lake City. **Proceedings ....** New York: Acm, 1995. p. 43-54. Disponível em: <http://sal-cnc.me.wisc.edu/index.php?option=com_remository&Itemid=143&func=startdown&id=52>. Acesso em: set. 2010.

SHELDEN, Dennis Robert. **Digital surface representation and the constructibility of Gehry's architecture.** 2002. 340 f. Tese (Doutorado) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2002.

SILVA, Elvan. **Uma introdução ao projeto arquitetônico.** Porto Alegre: Ed. UFRGS, 1984.

SILVA, Marcos Solon Kretli da. **A arquitetura líquida do NOX** . *Arquitextos*, São Paulo, 045.11, Vitruvius, fev 2004. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp222.asp>. Acesso em: jun. 2005.

SLESSOR, Catherine. Atlantic Star. **The Architectural Review**, Londres, v. 202, n. 1210, p. 30-42, dez. 1997.

SLESSOR, Catherine. Gehry's Geode: DG Bank headquarters in Berlin. **The Architectural Review**, Londres, v. 1, n. 8, p. 50-56, ago. 2001.

SMITH, David Eugene. **History of Modern Mathematics.** 4. ed. Boulder: Merchant Books, 2008. 72 p. (Mathematical Monographs).

SOARES, Cláudio Cesar Pinto. DESENHO, REPRESENTAÇÃO E OS PROCESSOS DE PRODUÇÃO. In: ENCONTRO REGIONAL DE EXPRESSÃO GRÁFICA, 5., 2006, Salvador. **Anais....** Salvador: UFBA, 2006. p. 1-13. CD-ROM.

SOARES**,** Cláudio Cesar Pinto. Uma abordagem histórica e cientifica das técnicas de representação gráfica. In: VII INTERNATIONAL CONFERENCE ON GRAPHICS ENGINEERING FOR ARTS AND DESIGN E 18º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMETRIA DESCRITIVA E DESENHO TÉCNICO, 2007, Curitiba. Graphica 2007. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. v. 1. p. 13-23

SOUSA, Marcos de. Museu de Arte de Milwaukee - EUA. **Projeto Design**, São Paulo, n. 267, p. 62-64, maio 2002. Mensal.

SOUZA, Livia L; Alves de; AMORIM, Sérgio R. Leusin; LYRIO, Arnaldo de Magalhães. Impactos do uso do BIM em escritórios de arquitetura: oportunidades no mercado imobiliário. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 4, n. 2, p. 26-53, nov. 2009.

SPERLING, David Moreno. **Arquiteturas Contínuas e Topologia:** similaridades em processo. 2003. 229 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SPERLING, David Moreno. Entre Conceitos, Metáforas e Operações: Convergências da Topologia na Arquitetura Contemporânea. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 24-55, nov. 2008.

SPERLING, David Moreno. **Museu Brasileiro da Escultura, utopia de um território contínuo**. Arquitextos, São Paulo, ano 02, n. 018.02, Vitruvius, nov. 2001. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/02.018/828>. Acesso em: dez. 2013.

SPUYBROEK, Lars. **NOX**: machining architecture. New York: Thames & Hudson, 2004.

STINY, George; GIPS, James. Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture. In: International Federation for Information Processing Congress 71, 1971, Ljubljana. **Information Processing 71.** Amsterdam: North-holland Pub. Co., 1972. p. 1460-1465. Disponível em: <http://www.shapegrammar.org/ifip/SGBestPapers72.pdf>. Acesso em: jul. 2011.

SUNG, Woojae. **Grasshopper Learning Material**. Apostila de aula, 2010. Disponível em: <http://www.schwartz.arch.ethz.ch/Vorlesungen/ParamTE/Dokumente/GrasshopperWorkspace.pdf?lan=en>. Acesso em: set. 2012.

SZALAPAJ, Peter. **Contemporary Architecture and the Digital Design Process.** Burlington: Architectural Press, 2005.

TANTON, James. **Encyclopedia of Mathematics.** New York: Facts On File, 2005. 568 p.

TEDESCHI, Arturo. **Parametric Architecture:** with grasshopper. Brienza: Le Penseur, 2011. 206 p.

TERZIDIS, Kostas. **Algorithmic Architecture**. Oxford: Architectural Press, 2006. 176 p.

TERZIDIS, Kostas. **Expressive Form:** A conceptual approach to computational design. New York, London: Spon Press, 2003. 104 p.

THE CONCRETE CENTRE. Turning Torso twists new life into cubism. **Concrete Quarterly**, Camberley, v. 3, n. 209, p. 4-7, set. 2004. Trimestral.

The Phaidon Atlas of 21st Century World Architecture. Londres: Phaidon Press, 2008.

The Phaidon Atlas of Contemporary World Architecture. Londres: Phaidon Press, 2004.

The Realisation of Complex Roof Geometries. **Roof&facade Asia**: framework for sustainability, Cingapura, v. 1, n. 1, p. 1-3, mar. 2004. Disponível em: <http://www.mero.com.sg/files/News%20-%20The%20Realisation%20of%20Complex%20Roof%20Geometries.pdf>. Acesso em: set. 2011.

TORRE AGBAR EN BARCELONA. **El Croquis**: Jean Nouvel 1994-2002, Madrid, n. 112/113, p. 238-251, 2002. Bimestral.

TORRE AGBAR. 2012. Disponível em : <www.torreagbar.com/> Acesso em: jul. 2012.

VELHO, Luiz; GOMES, Jonas; FIGUEIREDO, Luiz Henrique de. **Implicit Objects in Computer Graphics.** New York: Springer, 2002. 192 p.

VIDA, Janos; MARTIN, Ralph R.; VARADY, Tamas. A survey of blending methods that use parametric surfaces. **Computer-aided Design,** Amsterdam, p. 341-365. maio 1994.

VISUAL PROGRAMMING LANGUAGES. In: WAH, Benjamin W. (Ed.). **Wiley Encyclopedia Of Computer Science And Engineering.** [S.l.]: Wiley-Interscience, 2008. 3328 p.

WALT DISNEY CONCERT HALL. **El Croquis**: Frank Gehry 1996-2003, Madrid, n. 117, p. 50-87, 2003. Bimestral.

WALZ, Arnold; KILIAN, Axel; SCHINDLER, Susanne. Programming Knowledge. **Candide:** Journal for Architectural Knowledge. Bielefeld, n. 01, p. 49-68, Dez. 2009. Disponível em <http://www.candidejournal.net/wp-content/uploads/downloads/2011/05/CAN01_Encounters_WalzKilian.pdf>. Acesso em: jun. 2012.

WHITEHEAD, Hugh. Laws of Form. In: KOLAREVIC, Branko (Ed.). **Architecture in the digital age**: design and manufacturing. New York: Taylor & Francis, 2003. p. 81-100.

WHITEHEAD, Terri. Austrian Alien. **Architectureweek**: design and building in depth, Eugene, [S.l.], p. d.1.1-d.1.2, dez. 2003. Mensal. Disponível em: <http://www.architectureweek.com/2003/1203/design_1-1.html>. Acesso em: set. 2011.

WOLFF, Anita (Ed.). **Britannica Concise Encyclopedia.** Chicago: Encyclopedia Britannica, Inc., 2006. 2115 p.

WONG, Joseph F. The text of free-form architecture: qualitative study of the discourse of four architects. **Design Studies,** Online, p. 237-267. maio 2010.

WONG, Wucius. **Princípios de forma e desenho**. 2. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2001. 352 p.

WOODBURY, Robert. **Elements of Parametric Design.** Nova Iorque: Routledge, 2010.

WOODBURY, Robert; WILLIAMSON, Shane; BEESLEY, Philip. Parametric Modelling as a Design Representation in Architecture: A Process Account. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EDUCATION, INNOVATION, AND PRACTICE IN ENGINEERING DESIGN, v. 3, 2006, Toronto. **Proceedings ....** Toronto: Canadian Design Engineering Network, 2006. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu. edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.137.4219&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: jun. 2012.