

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAUrb)
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PROGRAU)



Dissertação

Malhas em projetos paramétricos com superfícies complexas:
Um repertório formativo para arquitetura

Fernando Franz Zauk

Pelotas, 2023

Fernando Franz Zauk

Malhas em projetos paramétricos com superfícies complexas:

Um repertório formativo para arquitetura

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, com área de concentração em Arquitetura, Patrimônio e Sistemas Urbanos, na linha de pesquisa Gráfica Digital Aplicada à Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Janice de Freitas Pires

Pelotas, 2023

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

Z39m Zauk, Fernando Franz

Malhas em projetos paramétricos com superfícies complexas : um repertório formativo para arquitetura / Fernando Franz Zauk ; Janice de Freitas Pires, orientadora. — Pelotas, 2023.

245 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Geometria complexa. 2. Projeto paramétrico. 3. Malhas. 4. Ensino de arquitetura. I. Pires, Janice de Freitas, orient. II. Título.

CDD : 720

Fernando Franz Zauk

Malhas em projetos paramétricos com superfícies complexas:

Um repertório formativo para arquitetura

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 25 agosto de 2023.

Banca examinadora:

Prof.^a Dr.^a Janice de Freitas Pires (Orientadora)

Doutora em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Brasil

Prof.^a Dr.^a Adriane Borda Almeida da Silva

Doutora em *Didáctica de Las Ciencias Experimentales* pela *Universidad de Zaragoza*, Espanha

Prof.^a Dr.^a Alice Theresinha Cybis Pereira

Doutora em Arquitetura pela *University of Sheffield*, Inglaterra

Prof. Dr. Carlos Eduardo Verzola Vaz

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Brasil

Resumo

ZAUK, Fernando Franz. **Malhas em projetos paramétricos com superfícies**

complexas: Um repertório formativo para arquitetura. Orientador: Janice de Freitas Pires. 2023. 245 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

O processo de projeto em meio digital evoluiu desde as tecnologias de representação, documentação técnica, simulação, avaliações de desempenho, até a abordagem do desenho paramétrico, que tem influenciado e subsidiado a produção atual de arquitetura. Antoni Gaudí e Frei Otto são considerados os pioneiros desta abordagem em seus processos de projeto, ainda que utilizassem modelos analógicos. Ambos desenvolveram modelos físicos capazes de modificar a forma baseados no uso de malhas suspensas e controladas por pesos variáveis. Para o momento atual dos processos digitais na arquitetura, as malhas expandiram seus usos junto à parametria, como soluções de representação, tesselação, análise e otimização de processos, soluções estruturais e a possibilidade de simulação da atuação de forças físicas para gerar geometrias curvas e otimizadas. Porém, o currículo dos cursos de arquitetura no Brasil ainda não incorpora tais saberes de maneira sistemática e disciplinar, o que dificulta sua apropriação no contexto profissional. Entende-se que é necessária uma base geométrica que propicie o avanço até níveis maiores de complexidade exigidos para o domínio do desenho paramétrico. Neste processo, é importante tratar as aplicações da geometria na arquitetura para além das questões estéticas, compreendendo como uma forma não trivial pode apresentar atributos funcionais que evidenciem a qualidade de um projeto para o contexto atual. Então, a partir de uma teoria didática, busca-se explicitar o saber envolvido nas aplicações de malhas da arquitetura contemporânea e compreender os conceitos geométricos que integram suas propriedades funcionais, estimulando sua apropriação na prática arquitetônica por meio do projeto paramétrico. Parte-se de uma revisão bibliográfica sobre aplicações de malhas na arquitetura, buscando identificar suas funções e propriedades aplicadas ao projeto e estabelecem-se os critérios de definição do corpo de análise da pesquisa, formado por projetos referenciais. Tendo-se como base o discurso dos arquitetos das obras,

tenta-se compreender o processo de projeto, os conceitos e as técnicas associadas, com base na noção estruturada do saber, de Yves Chevallard. O corpus de análise inclui as obras: Shellstar, com superfície definida pela atuação de forças físicas de compressão; Biosfera de Montreal, a primeira superfície da arquitetura com o conceito de geodésica a se destacar em questões de desempenho e meio ambiente; Projeto Éden, com superfície definida por um processo digital que é equivalente ao método analógico de bolhas de sabão de Frei Otto; Water Cube, com estrutura tridimensional definida por um modelo de bolhas, mas sua fachada configurada pelo diagrama de Voronoi, uma malha irregular com recorrência em padrões da natureza. A abordagem que associa desempenho das superfícies, estruturação formal e construtiva, análise e requisitos essenciais ao processo de projeto contemporâneo, integrados ao desenho paramétrico, permitiu identificar os conceitos geométricos implícitos e, mais do que isso, reconhecer e explicitar a própria interligação entre os projetos. O resultado é uma abordagem interdisciplinar e uma visão mais holística, por meio de estruturas de saber de projetos referenciais para a formação atual em arquitetura.

Palavras-chave: Geometria complexa. Projeto paramétrico. Malhas. Ensino de arquitetura.

Abstract

ZAUK, Fernando Franz. **Meshes in parametric designs with complex surfaces**: A formative repertoire for architecture. Advisor: Janice de Freitas Pires. 2023. 245 p. Dissertation (Masters in Architecture and Urbanism) - Postgraduate Program in Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2023.

The digital design process has evolved from representation technologies, technical documentation, simulation, performance assessments, to the parametric design approach, which has influenced and subsidized current architectural production. Antoni Gaudí and Frei Otto are considered the pioneers of this approach in their design processes, even though they used analog models. Both developed physical models capable of modifying shape based on the use of suspended meshes controlled by variable weights. For the current moment of digital processes in architecture, meshes have expanded their uses alongside parametrics, such as representation solutions, tessellation, analysis and process optimization, structural solutions and the possibility of simulating the performance of physical forces to generate curved and optimized geometries. However, the curriculum of architecture courses in Brazil still does not incorporate such knowledge in a systematic and disciplinary way, which makes its appropriation in the professional context difficult. It is understood that a geometric base is necessary to enable advancement to greater levels of complexity required to master parametric design. In this process, it is important to deal with applications of geometry in architecture beyond aesthetic issues, understanding how a non-trivial form can present functional attributes that highlight the quality of a project for the current context. Therefore, based on a didactic theory, the aim is to explain the knowledge involved in the applications of meshes in contemporary architecture and to understand the geometric concepts that integrate their functional properties, stimulating their appropriation in architectural practice through parametric design. It starts with a bibliographical review on mesh applications in architecture, seeking to identify their functions and properties applied to the project and establishing the criteria for defining the body of research analysis, formed by reference projects. Based on the discourse of the architects of the works, an attempt is made to understand the design process, the concepts and associated techniques, based on the structured notion of knowledge, by Yves Chevallard. The

corpus of analysis includes the works: Shellstar, with a surface defined by the action of physical forces of compression; Montreal Biosphere, the first surface architecture with the geodesic concept to excel in performance and environmental issues; Eden Project, with surface defined by a digital process that is equivalent to Frei Otto's analog soap bubble method; Water Cube, with a three-dimensional structure defined by a model of bubbles, but its facade configured by the Voronoi diagram, an irregular mesh with recurring patterns of nature. The approach that associates surface performance, formal and constructive structuring, analysis and essential requirements to the contemporary design process, integrated to the parametric design, allowed to identify the implicit geometric concepts and, more than that, to recognize and explain the interconnection between the projects. The result is an interdisciplinary approach and a more holistic view, through knowledge structures of reference projects for current architecture training.

Keywords: Complex geometry. Parametric design. Meshes. Architecture teaching.

Lista de Figuras

Figura 1.1 Modelo de cordas suspensas de Antoni Gaudí para A Sagrada Família.	22
Figura 1.2 Experimentos com películas de sabão de Frei Otto.	23
Figura 2.1 A conectividade das malhas. Porção superior: Malhas triangulares com a mesma conectividade, mas que representam formas geométricas bastante diferentes. Porção inferior: Duas malhas triangulares com a mesma forma, mas com uma conectividade muito diferente, o que influencia na aparência visual da malha.	48
Figura 2.2 Exemplos de malhas e seus usos na arquitetura. Na primeira linha, malhas de diferentes tipos de polígonos: triangulares, quadriláteros e hexágonais. Na segunda, terceira e quarta linhas: (A) O Pavilhão de Vidro (1914) de Bruno Taut; (B) O Estádio Olímpico de Munique (1972) por Frei Otto; (C) O telhado de vidro da Hippo House (1996) no zoológico de Berlim por Schlaich Bergermann und Partner; (D) A Ilha Mur (2003) de Vito Acconci; (E) O Sage Gateshead (1994-2004) de Foster and Partners; (F) O telhado da Feira de Negócios (2002-2005) em Milão por Massimiliano Fuksas.	49
Figura 2.3 A: Conjunto de pontos que dá origem às conformações de malhas irregulares. B: Definição de um diagrama de Voronoi a partir do conjunto inicial de pontos. C: Triangulação de Delauney para o mesmo grupo de pontos. D: Sobreposição das duas organizações irregulares sob o mesmo conjunto de pontos.	51
Figura 2.4 Classificação das malhas quanto à conexão e geometria das faces.	51
Figura 2.5 Tipos de aplicações das malhas na arquitetura.	54
Figura 2.6 Obras selecionadas. A: Shellstar. B: Estádio Olímpico de Munique. C: Biosfera de Montreal. D: Projeto Éden. E: Cobertura do Museu Britânico de Londres. F: Water Cube.	56
Figura 4.1 Vistas da Biosfera em Montreal.	66
Figura 4.2 Processo de subdivisão das faces e projeção dos novos pontos.	69
Figura 4.3 Subdivisão de um triângulo em triângulos menores (porção superior) e esferas geodésicas geradas a partir da projeção de tais faces.	70
Figura 4.4 Esquema teórico relativo a geometria e a arquitetura da Biosfera de Montreal.	72

Figura 4.5 Programação visual da Biosfera de Montreal.....	73
Figura 4.6 Esquema visual das etapas 1 e 2 da modelagem da Biosfera.....	74
Figura 4.7 Representação gráfica das etapas 1 e 2 da modelagem da Biosfera.	75
Figura 4.8 Esquema visual da etapa 3 da modelagem da Biosfera.	76
Figura 4.9 Representação gráfica da etapa 3 da modelagem da Biosfera.....	76
Figura 4.10 Fotografia da Biosfera de Montreal.	77
Figura 4.11 Esquema visual da etapa 4 da modelagem da Biosfera.	78
Figura 4.12 Representação gráfica da etapa 4 da modelagem da Biosfera.....	78
Figura 4.13 Corte esquemático da Biosfera de Montreal.	79
Figura 4.14 Esquema visual da etapa 5 da modelagem da Biosfera.	80
Figura 4.15 Representação gráfica da etapa 5 da modelagem da Biosfera.....	81
Figura 4.16 Detalhe de conexão entre as duas camadas de malhas.....	81
Figura 4.17 Esquema visual das etapas 6 e 7 da modelagem da Biosfera.....	82
Figura 4.18 Representação gráfica das etapas finais da modelagem da Biosfera....	83
Figura 5.1 Vista aérea do Projeto Éden, em Cornwall, na Inglaterra.....	88
Figura 5.2 Projeto Éden, vista aérea das estufas. A; Estufa de biomas tropicais úmidos. B: edifício de ligação. C: Estufa de biomas mediterrâneos.	89
Figura 5.3 Terreno do Projeto Éden antes da construção.....	90
Figura 5.4 Esquema de uma seção nos domos destacando a adaptação ao terreno irregular.....	90
Figura 5.5 Formações cristalinas de silicatos (SiO ₄).	91
Figura 5.6 Detalhe da estrutura visto de dentro da estufa.....	92
Figura 5.7 Padrões geométricos presentes nas malhas do Projeto Éden. A: composição de hexágonos, chamada de “Hex-Net”. B: composição de hexágonos e triângulos, chamada de “Tri-Hex-Net”. C: Sobreposição dos dois padrões. D: Perspectiva da dupla camada de malha como treliça.....	93
Figura 5.8 Fechamento dos domos com folhas de ETFE. À esquerda, detalhe do revestimento e à direita vista dos domos com destaque para o revestimento inflado.	94
Figura 5.9 Manutenção do fechamento em ETFE.....	95
Figura 5.10 Definição das três camadas de ETFE.	95
Figura 5.11 Vista das estufas do Projeto Éden. Destacado em vermelho o sistema de injeção de ar no revestimento dos domos.	96

Figura 5.12 Esquema teórico do Projeto Éden.....	97
Figura 5.13 Modelagem representando o encontro entre bolhas de sabão.	98
Figura 5.14 Representação da Lei de Plateau. Em vermelho a indicação do ângulo de 120° no plano bidimensional e em amarelo o ângulo de 109° tridimensionalmente.....	99
Figura 5.15 Esquema síntese do algoritmo e suas etapas para a geração da forma do projeto Éden.	100
Figura 5.16 Programação visual do Projeto Éden.....	101
Figura 5.17 Análise geométrica da estufa de Biomas de Trópico Úmido.	102
Figura 5.18 Corte esquemático do prédio com um esquema das circunferências interseccionadas.....	103
Figura 5.19 Representação gráfica das etapas 1, 2 e 3 do modelo do Projeto Éden.	104
Figura 5.20 Representação gráfica das etapas 1, 2 e 3 do modelo do Projeto Éden para todas geodésicas.	105
Figura 5.21 Representação gráfica das etapas 4, 5, 6, 7 e 8 do modelo do Projeto Éden.	106
Figura 5.22 Vistas superior, frontal, detalhe e perspectiva do modelo final do Projeto Éden.	107
Figura 5.23 Representação de circunferências concêntricas e equidistantes (interna e externa), com as tangentes e normais por um ponto destas.	108
Figura 5.24 Processo de obtenção da malha offset.	109
Figura 5.25 Processo de subtração da porção interseccionada.....	109
Figura 6.1 Fachada do Water Cube iluminada para Dia Olímpico Internacional de 2022.....	114
Figura 6.2 Dualidade dos projetos Water Cube (A) e Bird's Nest (B) em Pequim em fotografia noturna.....	116
Figura 6.3 Vista aérea do Water Cube.....	117
Figura 6.4 Tetradecaedro de Kelvin e seu modelo de agrupamento da bolha de sabão.....	120
Figura 6.5 Clatrato Na ₈ Si ₄₆ em vista superior (esquerda) e perspectiva (direita). .	121
Figura 6.6 Estrutura geométrica das ligações tetraédricas.	121

Figura 6.7 Estrutura mínima do composto $\text{Na}_8\text{Si}_{46}$, formada por dois clatratos (poliedros).....	122
Figura 6.8 A: poliedro de 14 faces. B: poliedro de 12 faces. C: Módulo do modelo de Weaire-Phelan.	122
Figura 6.9 Processo de criação da geometria do Water Cube.	123
Figura 6.10 Esquema teórico do Water Cube.	125
Figura 6.11 Esquema teórico sobre modelos de bolha de sabão.....	126
Figura 6.12 Etapas da modelagem do tetrakaidecaedro de Weaire-Phelan a partir da construção e transformação de um sólido.	128
Figura 6.13 Programação para modelagem dos poliedros do modelo de Weaire-Phelan a partir dos vértices.	129
Figura 6.14 Dodecaedro (linha superior) e Tetrakaidecaedro (linha inferior) em vista superior, frontal, lateral e perspectiva.	130
Figura 6.15 Faces pentagonais (A e B) e hexagonal (C) dos poliedros.	130
Figura 6.16 Planos de simetria de reflexão bilateral dos poliedros.	131
Figura 6.17 Representação gráfica da modelagem do tetrakaidecaedro a partir das transformações geométricas.....	132
Figura 6.18 Representação gráfica da modelagem do dodecaedro irregular a partir das transformações geométricas.....	132
Figura 6.19 Esquema síntese das etapas para a geração do modelo de Weaire-Phelan.....	133
Figura 6.20 Programação visual para o desenvolvimento do modelo de Weaire-Phelan.....	134
Figura 6.21 Representação gráfica do modelo de WP.....	135
Figura 6.22 Esquema síntese do algoritmo e suas etapas para a geração da forma do Water Cube.....	136
Figura 6.23 Repetição dos tetrakaidecaedros em cada um dos eixos separadamente e em conjunto. Fonte: Elaboração própria.	136
Figura 6.24 Programação visual para o desenvolvimento do modelo do projeto do Water Cube.....	137
Figura 6.25 Representação gráfica do modelo do Water Cube.....	138
Figura 6.26 Modelo final do Water Cube.	139
Figura 7.1 Vistas noturnas (aérea e perspectiva externa) do pavilhão Shellstar.....	147

Figura 7.2 Planta esquemática de localização, destacando o local do evento (azul) e o terreno que recebeu o Pavilhão Shellstar (vermelho).....	147
Figura 7.3 Diagrama esquemático do processo de projeto de desenvolvimento do Pavilhão Shellstar. Fonte: Modificado a partir de Matsys (c2022).	148
Figura 7.4 Fotografia em detalhe da flor da orquídea de Hong Kong e fotografia da bandeira dessa cidade.....	149
Figura 7.5 Processo de análise da geometria base (estrela de cinco pontas) do Pavilhão Shellstar a partir do esquema gráfico dos pontos iniciais.	150
Figura 7.6 Processo de tesselação e subdivisão da malha inicial do Pavilhão Shellstar.....	150
Figura 7.7 Processo de transformação das faces triangulares da malha inicial em polígonos hexagonais.....	151
Figura 7.8 Processo de aplicação e simulação das forças físicas na malha hexagonal do Pavilhão Shellstar.	152
Figura 7.9 Análise estrutural do pavilhão Shellstar para momento fletor (A), deflexão (B) e estresse do plano (C).....	152
Figura 7.10 Planificação (A), detalhe dos encaixes das células (B) e perspectiva interna do Pavilhão Shellstar (C).	153
Figura 7.11 Esquema de camadas do processo de geração da forma da Shellstar.	154
Figura 7.12 Comparativo entre as estrelas de cinco e seis pontas, com suas figuras centrais destacadas: em azul o pentágono e em vermelho o hexágono. ..	155
Figura 7.13 Esquema teórico inicial do Pavilhão Shellstar.....	156
Figura 7.14 Esquema síntese do algoritmo inicial e suas etapas para a geração da forma da Shellstar.....	157
Figura 7.15 Programação visual referente ao primeiro modelo do projeto do Pavilhão Shellstar.....	158
Figura 7.16 Representação da primeira proposta de processo de modelagem do Pavilhão Shellstar. Fonte: Elaboração própria.....	160
Figura 7.17 Padrão triangular (A) e hexagonal (B) de preenchimento da estrela de seis pontas com o polígono central destacado em vermelho.	161
Figura 7.18 Padrão triangular (A) e hexagonal (B) de preenchimento da estrela de cinco pontas com o polígono central destacado em azul.....	162

Figura 7.19 Comparativo das faces hexagonais das estrelas de cinco pontas geradas a partir de polígonos duais (A) e da padronização apresentada por Matsys (B).....	163
Figura 7.20 Comparativo das faces hexagonais das estrelas de cinco pontas geradas a partir do diagrama de Voronoi (A) e da padronização apresentada por Matsys (B).	164
Figura 7.21 Comparação das malhas subdivididas a partir de duas sequências de modelagem.	165
Figura 7.22 Redefinição do esquema teórico do Pavilhão Shellstar.	166
Figura 7.23 Redefinição do esquema síntese do algoritmo e suas etapas para a geração da forma da Shellstar.	167
Figura 7.24 Programação visual revisada para o modelo da Shellstar.	168
Figura 7.25 Representação gráfica das etapas 1, 2, 3 e 4 do modelo da Shellstar.	170
Figura 7.26 Representação gráfica da etapa 5 do modelo da Shellstar.	171
Figura 7.27 Representação gráfica das etapas 6 e 7 do modelo da Shellstar.	173
Figura 7.28 Vistas superior, frontal, perspectiva e detalhe do modelo final Pavilhão Shellstar.	174

Lista de Figuras AP

Figura AP 1 Esquema visual das etapas 1 e 2 da modelagem da primeira geodésica do Projeto Éden.	197
Figura AP 2 Representação gráfica das etapas 1 e 2 da modelagem do Projeto Éden.	197
Figura AP 3 Obtenção dos pontos de inserção das demais geodésicas.	198
Figura AP 4 Representação gráfica da inserção dos pontos centrais de todas geodésicas do Projeto Éden.	199
Figura AP 5 Esquema visual da etapa 3 da modelagem do Projeto Éden.	199
Figura AP 6 Representação gráfica da etapa 3 da modelagem do Projeto Éden. ..	200
Figura AP 7 Vista superior e perspectiva das etapas iniciais para as quatro geodésicas.	200
Figura AP 8 Esquema visual da etapa 4 da modelagem do Projeto Éden.	201
Figura AP 9 Representação gráfica da etapa 4 da modelagem do Projeto Éden. ..	202
Figura AP 10 Esquema visual da etapa 5 da modelagem do Projeto Éden.	203
Figura AP 11 Representação gráfica da etapa 5 da modelagem do Projeto Éden. .	204
Figura AP 12 Esquema visual da etapa 6 da modelagem do Projeto Éden.	205
Figura AP 13 Representação gráfica da etapa 6 da modelagem do Projeto Éden. .	206
Figura AP 14 Esquema visual da etapa 7 da modelagem do Projeto Éden.	207
Figura AP 15 Representação gráfica da etapa 7 da modelagem do Projeto Éden. .	208
Figura AP 16 Esquema visual da etapa 8 da modelagem do Projeto Éden.	209
Figura AP 17 Representação gráfica da etapa 8 da modelagem do Projeto Éden. .	210
Figura AP 18 Esquema visual de obtenção do tetrakaidecaedro a partir das transformações geométricas aplicadas em uma das faces.	211
Figura AP 19 Representação gráfica da modelagem do tetrakaidecaedro a partir das transformações geométricas aplicadas em uma das faces.	212
Figura AP 20 Esquema visual de obtenção do dodecaedro irregular a partir das transformações geométricas.	213
Figura AP 21 Representação gráfica da modelagem do dodecaedro irregular a partir das transformações geométricas.	214
Figura AP 22 Esquema visual da etapa 1 da modelagem do modelo de WP.	215
Figura AP 23 Representação gráfica da etapa 1 do modelo de WP.	215
Figura AP 24 Esquema visual da etapa 2 da modelagem do modelo de WP.	216

Figura AP 25 Representação gráfica da etapa 2 do modelo de WP.	217
Figura AP 26 Esquema visual da etapa 3 da modelagem do modelo de WP.	217
Figura AP 27 Representação gráfica da etapa 3 do modelo de WP.	218
Figura AP 28 Esquema visual da etapa 4 da modelagem do modelo de WP.	219
Figura AP 29 Representação gráfica da etapa 4 do modelo de WP.	220
Figura AP 30 Esquema visual da etapa 5 da modelagem do modelo de WP.	220
Figura AP 31 Representação gráfica da etapa 5 do modelo de WP.	221
Figura AP 32 Esquema visual da etapa 6 da modelagem do modelo de WP.	222
Figura AP 33 Representação gráfica da etapa 6 do modelo de WP.	222
Figura AP 34 Esquema visual da etapa 1 da modelagem do Water Cube.	223
Figura AP 35 Representação gráfica da etapa 1 do modelo do Water Cube.	223
Figura AP 36 Esquema visual da etapa 2 da modelagem do Water Cube.	224
Figura AP 37 Representação gráfica da etapa 2 do modelo do Water Cube.	225
Figura AP 38 Esquema visual da etapa 3 da modelagem do Water Cube.	225
Figura AP 39 Representação gráfica da etapa 3 do modelo do Water Cube.	226
Figura AP 40 Esquema visual da etapa 4 da modelagem do Water Cube.	226
Figura AP 41 Representação gráfica da etapa 4 do modelo do Water Cube.	227
Figura AP 42 Esquema visual da etapa 5 da modelagem do Water Cube.	228
Figura AP 43 Representação gráfica da etapa 5 do modelo do Water Cube.	229
Figura AP 44 Esquema visual da etapa 6 da modelagem do Water Cube.	230
Figura AP 45 Representação gráfica da etapa 6 do modelo do Water Cube.	231
Figura AP 46 Processo de representação da geometria base (estrela de cinco pontas) do Pavilhão Shellstar.	232
Figura AP 47 Esquema visual da etapa 1 da modelagem da Shellstar.	233
Figura AP 48 Representação gráfica da etapa 1 do modelo da Shellstar.	234
Figura AP 49 Esquema visual das etapas 2, 3 e 4 da modelagem da Shellstar.	235
Figura AP 50 Representação gráfica das etapas 2, 3 e 4 do modelo da Shellstar.	236
Figura AP 51 Esquema visual da etapa 5 da modelagem da Shellstar.	237
Figura AP 52 Representação gráfica da etapa 5 do modelo da Shellstar.	239
Figura AP 53 Esquema visual da etapa 6 da modelagem da Shellstar.	240
Figura AP 54 Representação gráfica da etapa 6 do modelo da Shellstar.	242
Figura AP 55 Esquema visual da etapa 7 da modelagem da Shellstar.	243
Figura AP 56 Representação gráfica da etapa 7 do modelo da Shellstar.	244

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Identificação das geometrias presentes nas faces das malhas em projetos de arquitetura.	56
Tabela 2.2 Identificação das funções/aplicações das malhas em projetos de arquitetura.....	58
Tabela 4.1 Classificação da Biosfera de Montreal quanto à geometria das faces da malha.	84
Tabela 4.2 Função da malha na Biosfera de Montreal.....	84
Tabela 5.1 Classificação do Projeto Éden quanto à geometria das faces da malha	110
Tabela 5.2 Função da malha no Projeto Éden	110
Tabela 6.1 Classificação do Projeto Éden quanto à geometria das faces da malha.	141
Tabela 6.2 Função da malha no Water Cube.....	142
Tabela 7.1 Classificação da Shellstar quanto à geometria das faces da malha.....	174
Tabela 7.2 Função da malha na Shellstar.....	175

Sumário

Capítulo 1	20
1. Introdução.....	21
1.1. Delimitação do tema.....	26
1.2. Justificativa.....	27
1.3. Delimitação do problema de pesquisa	28
1.4. Objetivos	28
1.4.1. Objetivos Específicos	29
1.5. Estrutura da dissertação	29
Capítulo 2.....	31
2. Revisão de literatura	32
2.1. O contexto da arquitetura digital	32
2.2. Arquitetura digital no contexto brasileiro	33
2.3. Arquitetura e o projeto paramétrico.....	35
2.4. O projeto paramétrico na prática de arquitetura.....	36
2.5. O projeto paramétrico no ensino de arquitetura	37
2.6. O papel da pesquisa em desenho paramétrico.....	39
2.7. Ensino de projeto (paramétrico).....	39
2.8. O ensino da geometria a partir das noções de transposição didática e estrutura do saber.....	42
2.9. Geometrias complexas da arquitetura.....	45
2.10. A geometria complexa e a aplicação de malhas na arquitetura	47
2.11. Aplicações das malhas na modelagem digital arquitetônica	51
2.12. Uma estruturação prévia do saber e delimitação do corpo de análise.....	55
Capítulo 3.....	60
3. Metodologia	61

Capítulo 4.....	65
4. Análise da Biosfera de Montreal (1967).....	66
4.1. Estrutura de saber da Biosfera de Montreal.....	72
4.2. Revisão das classificações quanto ao tipo de face e função da malha na Biosfera de Montreal.....	83
4.3. Análise e discussão de resultados.....	85
Capítulo 5.....	87
5. Análise do Projeto Éden.....	88
5.1. Estrutura de saber do Projeto Éden.....	97
5.2. Revisão das classificações quanto ao tipo de face e função da malha na Biosfera de Montreal.....	109
5.3. Análise e discussão de resultados.....	111
Capítulo 6.....	113
6. Análise do Water Cube.....	114
6.1. Estrutura de saber do Water Cube.....	125
6.2. Revisão das classificações quanto ao tipo de face e função da malha no Water Cube.....	140
6.3. Análise e discussão de resultados.....	143
Capítulo 7.....	146
7. Análise do Pavilhão Shellstar.....	147
7.1. Estrutura de saber do Pavilhão Shellstar.....	154
7.2. Redefinição da estrutura de saber do Pavilhão Shellstar.....	161
7.3. Revisão das classificações quanto ao tipo de face e função da malha no Pavilhão Shellstar.....	174
7.4. Análise e discussão de resultados.....	176

Capítulo 8.....	179
8. Conclusão.....	180
8.1. Indicação de trabalhos futuros	183
Referências	184
Apêndices.....	196
Apêndice A – Modelagem do Projeto Éden.....	197
Apêndice B - Modelagem das células de Weaire-Phelan.....	211
Apêndice C – Modelagem da estrutura (espuma) de Weaire-Phelan	215
Apêndice D – Modelagem do Water Cube	223
Apêndice E – Modelagem do Pavilhão Shellstar (estrela de cinco pontas).....	232

Capítulo 1

**Abordagem ao tema, justificativa, problema de pesquisa,
objetivos e estrutura da dissertação**

1. Introdução

O atual momento da prática profissional em arquitetura é caracterizado por processos de projeto desenvolvidos em meio digital, nos quais a arquitetura é gerada e concebida computacionalmente. Essa realidade proporciona ao projetista a oportunidade de lidar com questões para além da representação, que podem ser resolvidas digitalmente, principalmente a partir da abordagem do projeto paramétrico. De acordo com Kolarevic (2005), os meios digitais são caracterizados como um método colaborativo, que abrange simultaneamente as etapas de design, análises e simulações de desempenho de diversos tipos (estrutural, de conforto térmico e acústico), fabricação e montagem.

Segundo Hernandez (2004), o projeto paramétrico é considerado um novo passo na evolução do projeto arquitetônico, visto que é resultado de um avanço nos programas gráficos que incorporam essa tecnologia, permitindo ir além dos limites encontrados nos sistemas CAD. Trata-se de um processo de projeto baseado no pensamento algorítmico, pois promove a definição formal dos elementos e codifica suas relações por intermédio de um sistema de expressões (JABI ET AL., 2017). Um projeto construído num sistema paramétrico possui cada uma de suas partes delimitadas, estabelecendo uma definição da geometria de cada elemento do design - mesmo que implicitamente - e valorizando a sequência de desenvolvimento do projeto, suas relações e lógicas internas.

De acordo com Jabi et al. (2017), o interesse na representação final do modelo cede espaço para a associação entre a geometria concebida e as soluções relacionadas aos requisitos projetuais. Assim, esta abordagem tem facilitado a concepção e representação de formas complexas configuradas por geometrias que possuem elevado nível de desempenho - como as superfícies de dupla curvatura empregadas por Antoni Gaudí e Frei Otto a partir de seus modelos físicos experimentais.

Gaudí utilizava uma estrutura em malha formada por uma teia de cordas suspensas, sujeitas à ação da gravidade e a simulação de forças (ao pendurar sacos de areia de pesos variáveis), para encontrar configurações geométricas que mantivessem as propriedades estruturais desejadas (Figura 1.1). O arquiteto tinha

conhecimento de que, por meio da Lei de Hooke¹, toda curvatura gerada estaria em compressão total e, mesmo sem o advento da computação para os cálculos paramétricos, encontrou maneiras de aplicá-las manualmente em seus modelos.



Figura 1.1 Modelo de cordas suspensas de Antoni Gaudí para A Sagrada Família.
Fonte: Família (2018).

Posteriormente, Frei Otto também adotou estruturas em malhas para configurar seus projetos. O arquiteto desenvolvia sua pesquisa junto ao Instituto de Estruturas Leves de Stuttgart e foi responsável pelo uso de membranas (tecido) na arquitetura (Pottmann et al., 2007). Para isso, se apropriou de conceitos advindos de experimentos com bolhas de sabão para encontrar superfícies mínimas (CARMO, 1987) – desenvolvidos no século XIX, entre 1843-1869, por Plateau. Segundo Carmo (1987), a estabilidade dessas superfícies está relacionada com sua capacidade de voltar ao estado de equilíbrio depois de sofrer uma perturbação. Dessa maneira, Otto concebia estruturas em malhas, buscando configurar geometrias estáveis a partir de modelos físicos em membranas de sabão (Figura 1.2).

¹ Lei da física que estuda a deformação das molas. No século XVII, Robert Hooke descobriu que a força necessária para deformar uma mola era diretamente proporcional à deformação que esta sofria.

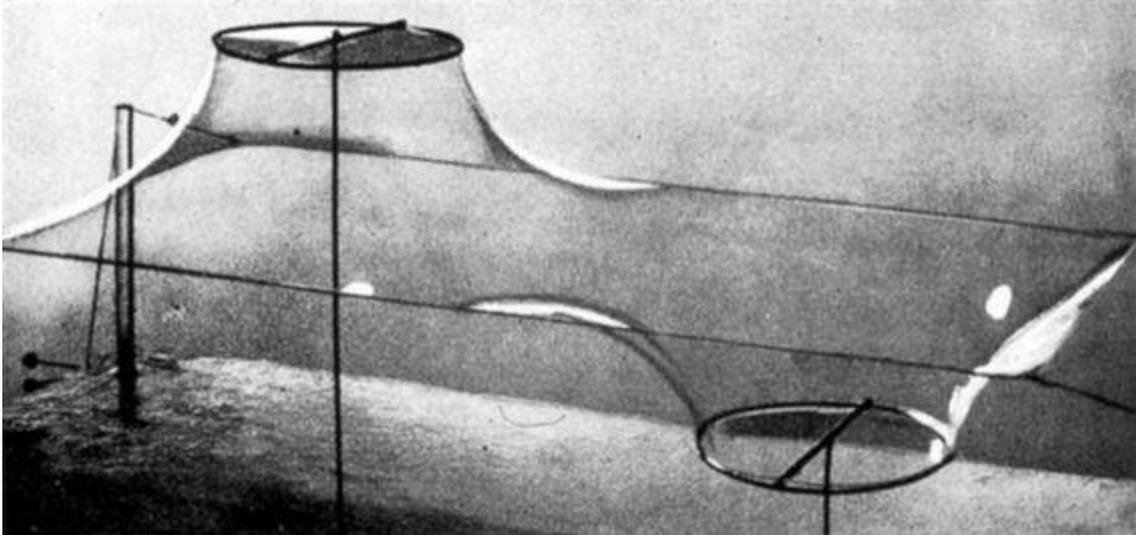


Figura 1.2 Experimentos com películas de sabão de Frei Otto.
Fonte: Zexin e Mei (2017)

Dessa maneira, Gaudí e Otto atingiam princípios de otimização e avançavam seus estudos relacionados à *performance* em arquitetura. Segundo Canestrino (2021) e Burry e Burry (2010), o "optimus" é o termo em latim que significa a configuração mais almejada dentro de um sistema, enquanto que a otimização engloba os processos e técnicas utilizados nessa busca. Ou seja, para o contexto arquitetônico, a otimização é a busca por um estado geométrico que represente esse "optimus".

Para Huerta (2006), Gaudí e Otto podem ser considerados os pioneiros em processos paramétricos analíticos de arquitetura, pois ambos definiam um espaço de projeto em meio físico, caracterizado com técnicas de cálculo e simulação para a busca de formas complexas otimizadas. Segundo Kolarevic (2005), as geometrias atuais podem ser entendidas como releituras de tais propostas e que agora estão mais acessíveis para serem aplicadas no projeto de arquitetura devido aos avanços tecnológicos dos meios digitais. O autor destaca que, no passado, a matemática já era capaz de defini-las formalmente, mas existia uma lacuna das tecnologias de representação e de construção que limitava a aplicação na arquitetura.

No entanto, nos últimos vinte anos, as formas complexas passam a estar mais presentes na arquitetura contemporânea, substituindo geometrias retilíneas que até então configuravam a maneira mais conhecida de se otimizar a estrutura e a superfície. De acordo com Kolarevic (2005), essa quebra da linearidade não é um interesse repentino, mas reflexo dos avanços tecnológicos que ampliaram as

possibilidades de representação no campo da arquitetura. Embora a arquitetura digital se expresse pela forma curvilínea e extremamente complexa, o autor não considera a forma orgânica como fator de união dos arquitetos, mas sim a integração que os recursos digitais possibilitam entre projeto e produção.

A arquitetura digital representa uma abordagem que vai além do pensamento tradicional de projeto, uma vez que busca introduzir novas maneiras de construir e projetar formas complexas, viabilizando propostas arquitetônicas inovadoras (KOLAREVIC, 2005). Para o autor, as mudanças não se limitam apenas a questões formais, mas também se estendem ao processo de projeto como um todo, ao passo que as informações contidas no modelo digital são inerentes à construção também. Neste cenário, as representações em arquitetura tornam-se processos mais dinâmicos, registrando o histórico do próprio desenvolvimento do projeto, permitindo a transformação e a visualização em tempo real das alterações da forma (ALMEIDA; NOGUEIRA, 2018). Para tanto, o projeto deve ser concebido com suas partes associadas desde o início, de modo que as alterações pontuais sejam capazes de gerar ações em conjunto em todo o modelo.

Não somente para demandas de concepção projetual, mas a arquitetura digital também busca dar apoio à resolução de questões relacionadas à construção civil e ao desenvolvimento sustentável - conceito estabelecido por Brundtland (1987) no relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Nesse sentido, Hubers (2011) define a arquitetura sustentável como aquela capaz de atender os requisitos atuais sem comprometer a capacidade das próximas gerações de suprirem suas próprias necessidades. Uma das maneiras pelas quais a arquitetura contribui para o desenvolvimento sustentável está diretamente relacionada com os processos desencadeados pelo desenho paramétrico, que, juntamente com tecnologias de análise e simulação, possibilita atingir resultados direcionados à otimização (CHI ET AL., 2009). Isso é viabilizado pelo reconhecimento das propriedades de cada material a ser empregado e pela seleção criteriosa desses materiais, reduzindo resíduos e desperdícios, a fim de promover uma maior eficiência energética na construção e criar ambientes mais confortáveis para os usuários.

No contexto da arquitetura digital, também são abordadas questões geométricas associadas ao desempenho da forma arquitetônica, especialmente em

projetos contemporâneos que tem como direcionamento a otimização e uma busca por um uso mais sustentável dos materiais de construção (BERTOL, 2011; PIRES; PEREIRA, 2018; OLIVEIRA; PIRES, 2021). Essa abordagem visa explorar as possibilidades oferecidas pelas ferramentas digitais para encontrar soluções arquitetônicas que sejam eficientes, econômicas e ecologicamente responsáveis.

Entretanto, é importante ressaltar que essa abordagem ainda não faz parte da maioria dos currículos das escolas de arquitetura do Brasil, o que aponta para a necessidade de os arquitetos buscarem essa formação ao ingressarem no contexto profissional (CELANI; BARBOSA NETO; FRANCO, 2018). Devido à exigência de um novo modo de pensar, esse tipo de projeto ainda é percebido pelos arquitetos – e consequentemente pelos estudantes - como avançado ou excessivamente complexo (STALS; JANCART; ELSEN, 2018).

Com o objetivo de promover a aprendizagem do projeto paramétrico na arquitetura, Pires, Pereira e Gonçalves (2017) enfatizam a importância de um reconhecimento do vocabulário geométrico, desde as geometrias mais elementares até níveis crescentes de complexidade, visto que esse processo facilita a compreensão sobre as técnicas de geração, os seus parâmetros de controle e a lógica relacional entre os elementos constituintes de tais geometrias. Leopold (2003) destaca que o ensino de geometria não deve ser tratado como uma disciplina isolada, pois terá significado somente quando associada às demais áreas do curso de arquitetura. Nesse sentido, é a partir da geometria que se pode traduzir questões formais, estruturais, estéticas e, até mesmo, de conforto e eficiência para o projeto arquitetônico. Além disso, o ensino da geometria promove o desenvolvimento da percepção espacial ao correlacionar os conceitos geométricos com situações concretas de arquitetura (LEOPOLD, 2003).

Pires (2018) ressalta que o ensino da representação gráfica digital não deve se limitar a capacitar os estudantes unicamente a serem exímios usuários das tecnologias digitais, mas abordar uma estrutura integral do saber, nos termos da Teoria Antropológica da Didática de Chevallard (1999). Essa teoria destaca que um saber está estruturado por quatro elementos que se relacionam dinamicamente: uma classe de problemas a serem resolvidos; as maneiras de resolução, denominadas de técnicas; os discursos que justificam e explicam as técnicas, denominados de

tecnologias; e os discursos que tem o papel de explicação e justificação frente as tecnologias, denominados de teorias.

Essa teoria se ocupa em estudar como um determinado saber é utilizado de acordo com o contexto que se insere, seja em uma abordagem científica (em que são produzidos e sistematizados discursos teóricos e tecnológicos), profissional (em que são empregadas as técnicas para a resolução dos problemas) ou educativa (a qual deve reconhecer todos os elementos envolvidos para um dado saber, que resulta na configuração de sua estrutura integral). A adoção da noção estruturada do saber tem apresentado resultados significativos no ensino da representação gráfica digital aplicada à arquitetura, especialmente no ensino da geometria em estágios iniciais de formação (SILVA ET AL., 2007; PIRES; SILVA, 2012; SILVA ET AL., 2012).

1.1. Delimitação do tema

Assim como Gaudí e Otto incorporavam conhecimentos geométricos em suas obras, por meio do emprego das malhas sujeitas a princípios de otimização, essa abordagem é amplamente empregada na arquitetura contemporânea, principalmente por meio do desenho paramétrico em ambiente digital. Autores como Pottmann et al. (2007) definem a malha como uma geometria originada a partir de polígonos planos, independentemente do número de lados, e destacam que a modelagem computacional tende a simplificar as formas por meio de triângulos devido à sua simplicidade geométrica.

O uso de malhas na representação digital se justifica pela simplificação dos cálculos matemáticos quando envolvidos na geração de geometrias curvas. Além disso, essa técnica também é voltada à criação de modelos de geometrias otimizadas resultantes de simulações de forças físicas. As malhas são capazes de subdividir superfícies complexas para resolver e suavizar superfícies não convencionais (PAN ET AL., 2016) e são empregadas em análises e processos de otimização de questões estruturais (FLEISCHMANN; AHLQUIST, 2009). Elas também resolvem questões pertinentes à construção civil, uma vez que qualquer forma curva pode ser construída a partir de painéis planos (FLEISCHMANN; AHLQUIST, 2009,) e oferecem a possibilidade de padronização (SHIMADA; GOSSARD, 1998), reduzindo a necessidade de múltiplos moldes na construção.

Diante disso é importante identificar e compreender os conceitos de geometria e representação gráfica digital associados à estruturação de uma forma arquitetônica complexa, construída com o auxílio das malhas. Visando atualizar os métodos de projeto digital, identifica-se a necessidade de abordar a parametria e explicitar os conceitos e parâmetros que definem as soluções dos projetos, e, dessa maneira, contribuir para a construção do conhecimento geométrico e tecnológico associado ao processo de projeto paramétrico no contexto do ensino.

1.2. Justificativa

A realidade dos escritórios de arquitetura, em especial no Brasil, revela certa resistência às mudanças tecnológicas da área, seja devido ao tempo necessário para dominar as novas ferramentas ou pela segurança proporcionada pelos métodos já estabelecidos. Essa resistência acaba por enrijecer o trabalho dos arquitetos, pois dificulta a adoção dos processos paramétricos e limita sua prática aos métodos tradicionais (CELANI; BARBOSA NETO; FRANCO, 2018).

Uma maneira de superar a falta de conhecimento para lidar com novas tecnologias no campo da arquitetura é abordá-las desde a graduação, aproximando os estudantes das questões profissionais e capacitando-os para as demandas da prática da construção civil. Porém, o projeto paramétrico representa uma nova demanda de desenvolvimento e processo projetual que não é contemplada no ensino com a qualidade necessária, conforme mencionado pelos autores anteriormente citados. Mesmo quando presente nos currículos dos cursos de arquitetura, o ensino desse processo de projeto é insuficiente para a vida profissional, sendo necessário que o indivíduo busque por complementar sua formação para utilizar efetivamente essa ferramenta em seu campo de atuação (CELANI; BARBOSA NETO; FRANCO, 2018).

O número de pesquisas que abordam a presença da geometria como base do conhecimento necessário para o projeto paramétrico, principalmente no contexto do ensino, ainda é limitado. Portanto, esta pesquisa surge da necessidade de entender de que maneira os conceitos geométricos associados à estruturação de uma forma arquitetônica complexa podem contribuir para a sua compreensão e apropriação, entendendo-se que a explicitação das soluções projetuais irá facilitar a aplicação desse conhecimento pelos estudantes de arquitetura.

Alguns projetos arquitetônicos são capazes de explicitar a geometria subjacente ao seu processo por meio da sua forma final. No entanto, mesmo que tenham ocorrido sucessivas transformações a partir de uma forma básica, a complexidade da geometria resultante acaba por dificultar a análise e o entendimento do projeto. Então, a compreensão das geometrias integradas ao projeto arquitetônico pode ser um meio de aproximação dos estudantes e arquitetos aos processos contemporâneos de design, em que o projeto paramétrico tem sido cada vez mais adotado.

1.3. Delimitação do problema de pesquisa

As superfícies poliédricas possuem diversos campos de atuação, desde a triangulação e simplificação de superfícies mais complexas até estudos de força e otimização estrutural por meio de cálculos paramétricos. Também desempenham um papel importante na análise e performance de superfícies totalmente contínuas. Além disso, são relevantes no contexto da construção civil, tanto pela economia de material em configurações formais que otimizam a estrutura, como pela racionalização do processo construtivo, reduzindo resíduos e evitando desperdícios por meio da padronização e repetição dos elementos.

A aplicação de superfícies complexas geradas por malhas poligonais requer um entendimento da geometria adotada, pois isso permite compreender suas propriedades, de modo que sua utilização seja uma escolha consciente do arquiteto e traga benefícios para a arquitetura. Assim, a pesquisa nessa área aborda questões didáticas, uma vez que é necessário explicitar esse conhecimento e integrá-lo à formação em arquitetura, proporcionando a construção de um repertório geométrico para a prática do projeto paramétrico com geometrias complexas, que têm sido recorrentes na arquitetura contemporânea dos últimos anos.

Portanto, busca-se responder o seguinte questionamento: como o saber subjacente às aplicações de malhas, configuradas por meio do desenho paramétrico em projetos com geometrias complexas, pode ser transposto para o ensino de arquitetura?

1.4. Objetivos

Estruturar o saber associado às superfícies complexas da arquitetura contemporânea, definidas por malhas e por meio do desenho paramétrico, a fim de

compreender como esse saber pode ser integrado aos processos formativos de geometria e representação.

1.4.1. Objetivos Específicos

- 1) Identificar aplicações da geometria de malhas na arquitetura e os correspondentes processos digitais por meio do desenho paramétrico;
- 2) Reconhecer os conceitos envolvidos no projeto paramétrico e em processos de projeto de escritórios de arquitetura que abordam superfícies curvas complexas definidas a partir de malhas;
- 3) Caracterizar essas geometrias, explicitando os conceitos geométricos envolvidos e os inerentes ao processo de modelagem por meio de malhas parametrizadas;
- 4) Apoiar a inserção do estudo de geometria complexa e modelagem paramétrica no âmbito da formação em arquitetura.

1.5. Estrutura da dissertação

No capítulo 1, aborda-se o tema central da pesquisa, que se concentra na arquitetura em meio digital, com foco no projeto paramétrico para a geração de formas complexas a partir da aplicação de malhas. Reconhece-se a importância da geometria nesse processo e sua aplicação no contexto de ensino, através da explicitação das suas relações. Com isso, delimita-se o problema de pesquisa, apontam-se os objetivos e justifica-se a relevância do estudo.

No capítulo 2 é feita a revisão de literatura sobre os temas abordados na introdução, expandindo-se para o contexto nacional e internacional da arquitetura paramétrica, suas diferenças na prática e no ensino de arquitetura, reconhecendo-se teorias de didática aplicadas ao contexto de ensino da representação gráfica digital e projeto em arquitetura. É feita também uma revisão sobre a aplicação de malhas em projetos de arquitetura referenciais. Esta revisão possibilitou definir os materiais e métodos utilizados na pesquisa, os quais serão apresentados no capítulo 3 da dissertação. Também se explica, no capítulo 3, como são coletados e analisados os dados, além de detalhar as etapas e os procedimentos adotados.

Nos capítulos 4, 5, 6 e 7 são realizadas as análises das obras selecionadas. Busca-se compreender suas geometrias, seja pelo discurso dos responsáveis ou

pela análise gráfica dos materiais disponíveis. Se explicita as estruturas de saber presentes nas obras, por meio de diagramas e em seus processos de representação gráfica digital, considerando os pressupostos da teoria didática adotada como referência. No capítulo 8 são apresentadas as conclusões do trabalho. Destacam-se os principais resultados e discutem-se suas implicações. Além disso, indicam-se possíveis direcionamentos de trabalhos futuros que possam ser desenvolvidos a partir deste estudo.

Capítulo 2

Revisão de Literatura

2. Revisão de literatura

Neste capítulo é feita uma revisão de literatura sobre os temas que envolvem essa pesquisa. A contextualização da arquitetura digital, explicando a mudança de paradigma do projeto em meio analógico para o meio digital/computacional; o contexto histórico da arquitetura brasileira em relação a tal mudança nos processos de projeto; o surgimento do projeto paramétrico em meio digital; e sua relação com arquitetura, a prática profissional, o ensino e a pesquisa. A revisão destaca o emprego das malhas como soluções de projeto paramétricos com geometrias complexas e para isso aborda os conceitos geométricos de Pottmann et al. (2007), por explicitarem a matemática que envolve a geometria da arquitetura. Na sequência, faz-se a revisão sobre a aplicação de malhas na arquitetura visando reconhecer seu papel na representação e no projeto.

Busca-se também compreender como o projeto paramétrico associado com os conceitos da geometria pode contribuir ao ensino. Recorre-se, assim, as teorias didáticas de Chevallard, a Teoria da Transposição Didática (1991) e a Teoria Antropológica da Didática (1999), as quais propõem um modelo explícito para estruturar o saber e que será utilizado na pesquisa.

2.1. O contexto da arquitetura digital

As tecnologias CAD surgiram por volta dos anos 60 e passaram a ser amplamente utilizadas nos anos 80, sendo abordadas, na arquitetura, como ferramentas de representação (ELOY; CRUZ, 2012). Naquela época, os projetistas não utilizavam as tecnologias de representação gráfica digital para o desenvolvimento do processo de projeto, que ainda era realizado de maneira tradicional, substituindo o desenho à mão com o objetivo unicamente de representação, para visualizar as ideias a partir de modelos.

Segundo Lacombe (2006), o tipo de ideia subjacente ao processamento que envolve a representação digital não é totalmente inovador para a arquitetura, é uma evolução de um processo que já existia desde o Renascimento. A base da representação arquitetônica tem sua origem na representação analógica, com base na geometria, definida a partir de processos gráficos para dar forma a um projeto de arquitetura. O desenho digital associado ao projeto de arquitetura nada mais é do que a continuidade e evolução desse processo, só que agora em sua sequência evolutiva: o suporte do computador e do meio virtual (LACOMBE, 2006).

Segundo Lacombe (2006), o uso das tecnologias digitais não se trata apenas de novidade e atualização tecnológica, mas traz benefícios em relação ao processo de projeto tradicional. Para Eloy e Cruz (2012), a arquitetura não é inteiramente um processo digital, mas o digital é um dos métodos que existe de se fazer arquitetura, que não exclui a criatividade dos projetistas, mas permite complementar, enriquecer e facilitar seus trabalhos - antes realizados de maneira manual.

Além da representação conceitual e técnica, ou o lançamento inicial da proposta, o processo de projeto em meio digital também lida com questões relacionadas à construção e ao gerenciamento da obra, que englobam requisitos de desempenho em diversas etapas do ciclo de vida do projeto. Isso possibilita uma arquitetura mais sustentável e exige que os arquitetos lidem com novos saberes para além do campo da arquitetura, que não podem ser expressos pelos modos tradicionais de representação de projeto (PETERS, 2011).

No contexto da sustentabilidade na arquitetura contemporânea, a ideia de minimizar o uso de materiais é apenas um aspecto inicial. Peters (2011) acredita que uma arquitetura sustentável deve combinar aspectos do meio ambiente, a cultura local, os sistemas construtivos e também as necessidades dos usuários. Porém, o autor cita a dificuldade em se criar uma tradição na pesquisa arquitetônica que pense a sustentabilidade, pois apesar dos esforços de disseminação do conhecimento da academia, na prática profissional os escritórios de arquitetura seguem concentrando para si o conhecimento. No entanto, ao se observar e estudar projetos com diretrizes de sustentabilidade na prática da arquitetura contemporânea, identifica-se a presença de soluções inovadoras que associam esses aspectos aos tipos de formas e geometrias utilizadas.

2.2. Arquitetura digital no contexto brasileiro

Celani (2018), ao fazer uma reflexão sobre a evolução da arquitetura no Brasil nos séculos XX e XXI, destaca a arquitetura brasileira com o surgimento da cidade de Brasília, a exposição de prédios nacionais como obras de arte e o reconhecimento de arquitetos brasileiros com premiações Pritzker – como por exemplo Oscar Niemeyer e Paulo Mendes da Rocha. Porém, segundo a autora, essa evidência estagnou avanços no cenário nacional, gerando uma acomodação que impediu o país de acompanhar o desenvolvimento arquitetônico internacional, tanto na prática profissional como no ensino de arquitetura.

Ainda segundo a autora, existe um atraso no desenvolvimento da arquitetura no Brasil em comparação com os países mais desenvolvidos, o que resultou na perda de status de referência e na busca por se equiparar ao desenvolvimento já alcançado no exterior. No âmbito internacional, as tecnologias digitais são aplicadas desde o lançamento do projeto, explorando aspectos da forma, implantação e orientação no terreno, através de análises de ganho térmico, insolação, sombreamento, estruturas e incidência de ventos (CAMPOS, 2018). Ou seja, escritórios de arquitetura fora do contexto brasileiro utilizam esse ambiente digital não apenas para o lançamento e modelagem do projeto, mas também como meio de desenvolvimento do mesmo.

Um fator agravante para essa situação é a falta de diálogo entre profissionais e pesquisas nacionais, levando à importação de tecnologias mesmo quando há opções locais viáveis (CELANI, 2018). A falta de preocupação com a transposição do saber acadêmico para o contexto profissional gera um distanciamento entre os dois setores, pois cada escritório/arquiteto busca soluções que atendam às suas necessidades específicas, sem promover uma colaboração efetiva para o crescimento da arquitetura brasileira como um todo. Nesse sentido, é necessário estabelecer uma maior integração entre o meio acadêmico e profissional, para incentivar a troca de conhecimentos e experiências, visando ao avanço conjunto da arquitetura nacional.

De acordo com Sperling, Herrera e Scheeren (2020), os avanços nacionais mais significativos ocorrem no âmbito do ensino, com a participação ativa da pesquisa brasileira em conferências de gráfica digital, como o SIGraDi, que contam com uma rede de troca de conhecimento. Neste ponto, é evidente o distanciamento da prática profissional com o ensino, uma vez que as universidades buscam se apropriar das tecnologias digitais, enquanto a prática profissional ainda está ligada à cadeia construtiva vigente, que não se apropriou das novas tecnologias em seus processos de desenvolvimento de produtos e ainda perpetua as práticas baseadas em técnicas de construção tradicionais. Para os autores, isso gera uma clara separação no incentivo – principalmente econômico – ao desenvolvimento digital na indústria e no meio acadêmico na América Latina, mas que reflete com clareza a situação brasileira.

2.3. Arquitetura e o projeto paramétrico

Segundo Woodburry (2010) os principais meios de se trabalhar com projeto sempre estiveram relacionados com lápis, borracha e papel, pois tais tecnologias são responsáveis por dar suporte à manipulação de elementos gráficos (adicionar, subtrair, sobrepor, representar, etc). Para o autor, a transição do analógico ao digital apenas emulou tais ações já conhecidas dos arquitetos, replicando-as tal como aconteciam antigamente. Foi a partir do advento do desenho paramétrico que passou a existir uma mudança significativa no modo de utilização das tecnologias digitais, direcionando também o pensamento do projeto.

Questões relativas ao desempenho em arquitetura, como estrutural, de eficiência energética, exposição solar, acústica e outras tantas são tradicionalmente discutidas após a definição da forma (ASANOWICZ, 2017). Porém, quando a arquitetura – e os projetos com diversas soluções - passa a ser abordada digitalmente, Asanowicz (2017) caracteriza como inviável tentar resolver individualmente cada um desses pontos, pois aumentaria a demanda de tempo e investimento. Então, o autor aponta uma solução a partir de uma abordagem integrada e otimizada em ambientes digitais, em que os modelos são gerados automaticamente depois de atender todas as restrições impostas, reduzindo o tempo do projeto e do ciclo de otimização.

O projeto paramétrico é um processo de investigação formal que se utiliza de diferentes variáveis, a fim de gerar um modelo em que sua premissa principal não está na conformação formal arquitetônica, mas na declaração de seus parâmetros que originam uma configuração da forma (PAZINI; MUSSI, 2019). Asanowicz (2017) salienta justamente o termo “parâmetro”, em que o projeto é minuciosamente descrito por meio de seus parâmetros e relacionamentos para gerar formas originais e difíceis de descrever, mas que apresentam precisão matemática. Embora tais autores destaquem os parâmetros como elementos principais da configuração do projeto paramétrico, ainda é a partir da geometria que se configura a forma arquitetônica. Pois, a arquitetura paramétrica é a configuração de uma geometria com sua origem em definições expressas por parâmetros e, conseqüentemente, em variações destes, criando em cada uma das situações uma solução única e original para a forma final, independente da geometria obtida nesse processo.

Sistemas de modelagem paramétrica fornecem uma estrutura potente para a concepção de projetos, permitindo a descrição de múltiplas instâncias em um único modelo (HERNANDEZ, 2004). Para isso, deve-se relacionar os elementos entre si, um ato que requer um pensamento explícito sobre cada conexão realizada no modelo (WOODBURRY, 2010). As conexões precisam ser evidentes, construídas e desconstruídas com facilidade, para que novas relações possam ser realizadas. Isso explicita a matemática integrada do projeto, de tal modo que o autor compreende o designer (responsável pelo projeto) como uma formação múltipla, sendo parte arquiteto, parte cientista da computação e parte matemático. Tal contexto colaborativo entre as diferentes áreas é um indício da necessidade de uma formação cada vez mais ampla e que integre novos saberes ao curso de arquitetura.

2.4. O projeto paramétrico na prática de arquitetura

A realidade dos escritórios de arquitetura, em especial no Brasil, mostra que inicialmente acabam não adotando no seu dia a dia as mudanças tecnológicas da área, seja por julgarem necessário muito tempo investido para domínio das tecnologias envolvidas ou a segurança adquirida com métodos utilizados tradicionalmente. Segundo Peter Mehrrens, ao passo que profissionais resistem em abordar os novos métodos de projeto, a barreira criada para essas novas tecnologias acaba por enrijecer suas práticas ao manter os métodos tradicionais e não abrir espaço para os processos paramétricos (CELANI; BARBOSA NETO; FRANCO, 2018).

Aos poucos, as tecnologias digitais transitaram de meras alternativas de representação até assumirem o processamento de informação e, com isto, os escritórios de arquitetura passaram a investir em abordagens de projeto e geometria com complexidade cada vez maior (STALS; JANCART; ELSÉN, 2018). Porém os mesmos autores ressaltam que isso tem maior apropriação quando tais escritórios investem em equipes especializadas para adaptar o próprio processo de projeto às novas tecnologias, desenvolvendo softwares específicos, situação recorrente em grandes escritórios ao redor do mundo.

Apesar de os estudos começarem a apontar uma adoção da parametria como prática de projeto nos escritórios de arquitetura, muito pouco se quantifica ou especifica o contexto em que ela está sendo adotada. Segundo Stals, Jancart e Elsen (2021), isso ocorre porque os estudos são direcionados para grandes

escritórios (ou para o meio acadêmico), o que significa uma parcela muito pequena da realidade dos escritórios de arquitetura.

De acordo com os mesmos autores, o único estudo que busca explorar o processo de desenvolvimento de projeto paramétrico a partir do ponto de vista de pequenos escritórios foi desenvolvido na Áustria, porém não avançou devido à falta de participação do público. Nesse estudo, apenas 12,5% relataram fazer uso do projeto paramétrico regularmente. Isso porque os arquitetos entrevistados acreditam ser uma tecnologia voltada para projetos grandes e complexos, que são apropriadas apenas para arquitetos famosos em seus projetos diferenciados e que possuem grande subsídio econômico.

2.5. O projeto paramétrico no ensino de arquitetura

Conforme descrito anteriormente, os projetos arquitetônicos estão cada vez mais se comunicando de forma digital, aumentando as variáveis de informações e dados, que, conseqüentemente, criam novas possibilidades, desafios e campos de atuação para arquitetos e urbanistas. Segundo Seifert e Petzold (2018), quando se referem ao contexto do curso de pós-graduação em arquitetura e urbanismo em um curso voltando à manipulação de informação e sua representação visual, afirmam que os estudantes possuem dificuldades para selecionar as tecnologias digitais necessárias para a solução de seus problemas e, quando sabem, possuem dificuldades ao aplicá-las no projeto. Ou seja, a própria transição para os meios digitais tem reflexos no ensino em arquitetura.

A escolha de uma abordagem digital no processo de projeto dos estudantes de arquitetura visa facilitar a representação das soluções projetuais e evitar um trabalho repetitivo e manual. O impasse estende-se além da definição das tecnologias utilizadas durante o processo, isso porque ao questioná-las, induz-se a promoção e o incentivo dos avanços na área (SEDREZ, 2018a). Para o autor, é recomendado que arquitetos, pesquisadores e estudantes se apropriem dessas tecnologias para tirar proveito de seus potenciais e enfrentar suas fraquezas, pois se está vivendo apenas o início de uma era de exercício digital, de computação e fabricação em projetos arquitetônicos.

Para o ensino em arquitetura, à medida que as tecnologias digitais começam a desempenhar um papel importante, é essencial compreender que isso não implica

em abordar a graduação como um curso focado em softwares, cujo objetivo é treinar os estudantes para que se tornem especialistas digitais ou programadores. Em Celani, Barbosa Neto e Franco (2018), Peter Mehrrens enfatiza a importância de capacitar os estudantes sem transformá-los em especialistas, ao ressaltar a necessidade de um estudo contínuo em arquitetura, semelhante a qualquer outra atividade profissional. Os profissionais devem estar constantemente buscando aprimorar suas habilidades e se qualificar para a prática profissional. No entanto, deve-se estabelecer um equilíbrio neste processo.

Nesse sentido, o ensino do desenho paramétrico deve ser tratado com a profundidade e seriedade necessária para se desvincular da ideia de ensinar os estudantes a lidar com softwares, pois também requer uma nova maneira de lidar com o projeto arquitetônico. Segundo Wannan (2016), os métodos de projeto digital que envolvem a parametria são aplicados superficialmente e reduzidos a ferramentas de geração de forma. Para evitar isso, é necessário integrar o projeto paramétrico ao ensino, considerando-o e valorizando-o como método a partir de um novo pensamento de projeto, para desenvolver uma arquitetura mais atual e alinhada ao contexto digital.

Atualmente, o ensino de projeto paramétrico em cursos de arquitetura está voltado para softwares como *Rhinceros/Grasshopper* e *Revit/Dynamo*, porque são tecnologias que utilizam um ambiente digital amigável para os arquitetos, abordando a modelagem algorítmica a partir da programação visual (PAZINI; MUSSI, 2019). Esses softwares permitem a criação de algoritmos complexos de maneira mais intuitiva, uma vez que não exigem a manipulação direta em um ambiente de programação usual. Ao substituir os tradicionais scripts por elementos de programação visual, facilita a interação com o público-alvo, pois proporciona uma abordagem mais acessível, permitindo que os arquitetos entrem em contato com uma lógica algorítmica amigável.

Além disso, a integração entre o *Rhinceros* e o *Grasshopper* oferece outra vantagem ao permitir a exportação dos modelos gerados para softwares de análise mais complexos (SEDREZ, 2018b) e, também, integrar tais análises de volta ao ambiente paramétrico. Isso significa que, além de criar algoritmos, os arquitetos podem avaliar e analisar os projetos utilizando ferramentas especializadas, agregando valor ao processo de design. Essa integração proporciona uma

abordagem mais abrangente, permitindo explorar não apenas a forma e a estética do projeto, mas também suas características estruturais e ambientais. Dessa maneira, esses softwares oferecem uma plataforma que combina a escrita e a criação de algoritmos com recursos de análise avançada, possibilitando ao projeto paramétrico em arquitetura uma abordagem mais abrangente e integrada.

2.6. O papel da pesquisa em desenho paramétrico

Hudson (2008), a partir da revisão de artigos de conferências, percebe uma crescente popularidade das tecnologias de projeto paramétrico na prática arquitetônica. Mais do que isso, ele identifica nas pesquisas uma abordagem direcionada para o campo conceitual. Por outro lado, o autor percebe exatamente o contrário na prática profissional, cujo foco principal está no desenvolvimento das etapas do processo de projeto.

Por isso, entende-se que a pesquisa possui um papel fundamental que é o de aproximar a prática e o ensino de desenho paramétrico. Deve-se pensar na prática profissional em como comunicar esses avanços dos grandes escritórios junto aos cursos de arquitetura, de maneira que prepare os estudantes também para o uso cotidiano dos recursos tecnológicos focados em abordagens paramétricas junto a sua prática profissional futura.

2.7. Ensino de projeto (paramétrico)

Segundo Florio (2011), o ensino de arquitetura deve ter suas disciplinas conectadas para atuarem de modo integrado na formação dos estudantes. Essa integração deve ocorrer não só entre diferentes disciplinas, mas o autor também acredita que a aproximação dos conteúdos antigos, aqueles já consolidados, e os novos, inusitados e inovadores, proporciona uma base mais sólida para o pensamento em arquitetura. O autor considera a arquitetura além da aplicação da técnica, seja ela a tradicional ou somente a alternativa mais atual, mas a combinação das duas para promover uma arquitetura mais completa. E, para isso, Florio (2011) reforça a importância de integrar os novos saberes da arquitetura digital com os conteúdos já estabelecidos no currículo de arquitetura. Nesse sentido, a necessidade de atualização dos processos de projeto é essencial para a formação em arquitetura, não apenas como uma atualização dos métodos, mas como oportunidade para reflexão e crítica de maneira construtiva à prática profissional.

Segundo Romcy, Tinoco e Cardoso (2015), é necessário que os estudantes se adaptem ao ambiente de software paramétrico e compreendam seus princípios e lógicas subjacentes. Nesse sentido, os autores descrevem uma lista de habilidades necessárias para aplicar a modelagem paramétrica, originalmente estabelecida por Woodburry (2010), e que apoia a discussão sobre os principais pontos de desenvolvimento dos estudantes/arquitetos para a abordagem paramétrica no projeto durante o ensino de arquitetura.

Inicialmente, Romcy, Tinoco e Cardoso (2015) citam que o pensamento abstrato e o pensamento matemático são habilidades que os arquitetos já devem estar familiarizados. Depois, comentam que conceber fluxo de dados, dividir o projeto em partes e nomear os elementos são questões específicas de um modelo construído em ambiente paramétrico. Estas são adaptações necessárias que os estudantes deverão se familiarizar para que desenvolvam seus trabalhos nesse novo processo de projeto. Além disso, os autores elegem o pensamento algorítmico como o maior obstáculo enfrentado durante a implementação do projeto paramétrico. Para eles, a dificuldade está na comunicação, fazer com que os estudantes e arquitetos se apropriem da linguagem computacional.

O ensino de projeto paramétrico demanda dos estudantes um entendimento além da construção do projeto ou modelo, mas o entendimento das relações entre os elementos (WOODBURY, 2010). Isso aumenta a complexidade do processo de projeto, pois o arquiteto deixa de se preocupar apenas com os elementos/forma e passa a ter que encarar o desafio de incorporar no projeto associações entre as partes, de maneira a controlar não só o objeto, mas também seus efeitos e reações frente a cada mudança de parâmetro. Para Woodburry (2010), ser capaz de explicitar os encadeamentos internos da geometria, para transformar e manipular a modelagem em resultados semelhantes, é o fator que comprova a necessidade do real entendimento desta geometria para o uso do desenho paramétrico. Isso pois, segundo o autor, por vezes é necessário entender a matemática básica implícita para realmente criar um modelo.

A geometria é a disciplina responsável por desenvolver a noção espacial dos arquitetos, a partir dela que os arquitetos são capazes de apoiarem-se em representações 2D para compreender e interpretar o espaço 3D (LEOPOLD, 2003). Em seu relato da experiência didática do desenho paramétrico no ensino de

arquitetura, Florio (2011) descreve que as atividades propostas para os alunos apresentavam mais de um propósito. Ou seja, as geometrias não foram introduzidas aos estudantes como um conteúdo específico, mas como um complemento de algum assunto abordado em projeto naquele respectivo semestre. A abordagem do autor destaca a associação de questões conceituais, geométricas, construtivas e materiais para uma abordagem integrada do projeto arquitetônico a partir da modelagem paramétrica

Desse modo, as dificuldades encontradas no processo de abordar o projeto paramétrico junto ao ensino de arquitetura referem-se ao mesmo tempo às questões gerais do próprio curso, como a abordagem integral das disciplinas (especialmente a geometria), e às questões mais específicas e distantes da realidade do curso, como a linguagem computacional. Em seu estudo, Seifert e Petzold (2018) constataram que, apesar de os estudantes saberem os conceitos necessários para as atividades, ainda encontravam dificuldade em aplicá-los de modo a agregar conhecimento à atividade. Nesse sentido, os autores sugerem que a barreira no ensino de programação ocorreu quando os estudantes adquiriram uma bagagem significativa de conhecimento adicional de uma só vez na tentativa de entender a linguagem de programação.

Segundo Seifert e Petzold (2018), essa barreira acontece no início, quando os estudantes se deparam com elementos de linguagem sintática. Ou seja, a dificuldade está em compreender e se adaptar a uma nova maneira de pensar o projeto: não só saber lidar com os elementos que integram o projeto, mas perceber suas relações. Para os autores, o ensino de geometria reduz a necessidade de o aluno se deparar com o problema de linguagem e de conteúdo (geométrico) ao mesmo tempo. Uma vez que o estudante já domina o conhecimento geométrico, é só questão de adaptar esse saber para a linguagem da ferramenta paramétrica.

Então, entende-se que o ensino do projeto paramétrico abordado a partir da relação entre os conceitos de geometria e suas aplicações em obras complexas contemporâneas, auxilia na compreensão da lógica formal envolvida na programação visual, por explicitar os conceitos que originam a forma. Segundo Pazini e Mussi (2019), as aulas teóricas sobre parametrização criaram expectativa nos alunos, aumentando a concentração nas atividades práticas em sequência,

principalmente quando os estudantes descobrem suas habilidades para resolver o problema de design paramétrico proposto.

2.8. O ensino da geometria a partir das noções de transposição didática e estrutura do saber

Até o momento, a revisão teórica sobre o ensino do projeto arquitetônico aborda questões de métodos de projeto, com o objetivo de compreender o ensino de um processo de projeto de uma arquitetura cada vez mais digital. Nesse contexto, destaca-se o projeto paramétrico, metodologia que envolve lógica projetual associada com saberes de geometria, para descrever as relações dos elementos que compõem a forma. Com isso, torna-se fundamental abordar questões relacionadas ao ensino da geometria e assim compreende-se que a Teoria da Transposição Didática e a Teoria Antropológica da Didática, de Yves Chevallard (1991; 1999), oferecem um modelo para a explicitação e sistematização de tal saber.

Pensando nas situações citadas anteriormente em Celani (2018) sobre a falta de comunicação entre o ensino/pesquisa e a prática profissional de arquitetura no Brasil, bem como o relato de Peters (2011) sobre a dificuldade da troca de conhecimento entre estes mesmos contextos, entende-se que há a necessidade de integrar, nos processos de ensino, os saberes científicos e os saberes da prática profissional. De acordo com a Teoria da Transposição Didática, de Chevallard (1991), existe um saber de referência, nesse caso aquele que permeia o contexto científico, mas que para alcançar um novo sujeito, referente à prática profissional, deve passar por um processo de transformação e adaptação do saber para a realidade do contexto de ensino (que envolve a instituição de ensino e os estudantes). O resultado da pesquisa em arquitetura (saber científico) só poderá ser transposto para a prática profissional caso esteja adaptado para este meio.

Isto significa, nos termos de tal teoria, não só ajustar o saber para essa nova realidade, mas contextualizá-lo de modo a contribuir para a formação do conhecimento prático em arquitetura. E para isso busca-se compreender a estrutura que envolve esse saber. Chevallard (1999), no âmbito da Teoria Antropológica da Didática, considera que esta estrutura pode ser explicitada a partir de quatro elementos fundamentais: problemas (conjunto de tarefas); técnicas de resolução deste problema (o saber fazer aplicado as tarefas); tecnologias (discursos que explicam, justificam e suportam as técnicas, sendo assim aquele saber teórico que

justifica e explica porque as técnicas funcionam para uma dada tarefa ou problema); e teorias (discursos que explicam, justificam e suportam as tecnologias, referindo-se a um aporte teórico de explicações e justificações em níveis mais profundos sobre o saber tecnológico, dando suporte inclusive a criação de novas tecnologias).

Essa teoria advém de um campo disciplinar além da arquitetura, específico para a área da matemática, que visa compreender as dificuldades de desenvolvimento do pensamento abstrato. Sua sobreposição com o campo de arquitetura ocorre, pela primeira vez, a partir de Borda (2001), que abordou a teoria direcionada para o campo da representação gráfica digital no contexto do curso de arquitetura. Seus estudos sobre os saberes constituintes da gráfica digital resultaram não apenas em pesquisas no âmbito da representação gráfica digital em arquitetura, que estão em curso até o presente momento, mas inclusive na configuração de um programa de pós-graduação em nível de especialização para as referidas áreas de conhecimento, abrangendo também profissionais do design, matemática e afins. A pesquisadora identificou a gênese de tal saber, reconhecendo e sistematizando os elementos que o caracterizam visando um processo transpositivo para a formação em arquitetura. Como desdobramento da pesquisa de Borda (2001), as teorias de Chevallard foram adotadas em diversos contextos de ensino por pesquisadores do Grupo de Estudos para o ensino/aprendizagem de Gráfica Digital (GEGRADI) da FAUrb, UFPel.

Em Silva et al., (2007), as autoras relatam as atividades desenvolvidas junto ao curso de especialização em Gráfica Digital, que instigaram os alunos a explicitar as técnicas e teorias referentes ao processo de modelagem que empregam conceitos de luz e sombra. Nesse contexto, as autoras concluem que, enquanto os alunos desenvolvem esquemas visuais para sistematizar a própria atividade, acabam por explicitar os elementos do saber que a integram. Isso, de acordo com as autoras, induz à ampliação do vocabulário e repertório referente à gráfica digital e um maior domínio sobre os processos empregados.

Posteriormente, essa metodologia é aplicada junto aos estudantes dos semestres iniciais do curso de graduação em arquitetura, mais especificamente em disciplinas de geometria (SILVA ET AL., 2012). A abordagem buscou integrar projeto e geometria em uma única estrutura de saber, para construir um conhecimento mais integrado em arquitetura. Nesse caso, as autoras detalham a atividade responsável

por aproximar os estudantes desses saberes a partir de uma apropriação dos elementos identificados como componentes da estrutura do saber: o saber propriamente dito, no contexto científico/ensino, que se concentra em elementos teóricos e tecnológicos; e o saber-fazer, inserido em um contexto mais profissional, cujo foco está nos problemas e técnicas.

Avança-se, então, para a aplicação do processo junto ao projeto arquitetônico (PIRES; SILVA, 2012). Nesse estudo, em um primeiro momento, foram identificadas as estruturas iniciais que apoiavam as atividades de análise de projeto. Em seguida, as autoras relatam que esse processo demonstrou a necessidade de potencializar a atividade por meio de novas estruturas que complementavam aquelas propostas inicialmente. Assim, as autoras avançaram na construção do conhecimento ao passo que propuseram aos alunos que buscassem conteúdos complementares à estrutura, abordando todos os elementos que configuram essa estrutura de saber de Chevallard (1999).

Pires (2018), em sua pesquisa, estuda a geometria complexa da arquitetura a partir da análise e representação de obras referenciais com superfícies curvas, que são explicitadas em seus aspectos teóricos por autores da área. A partir de um discurso prévio de arquitetura, o saber envolvido é analisado e explicitado por meio de referenciais das áreas da matemática e da física, os quais possibilitam avançar na modelagem paramétrica de tais superfícies complexas. A modelagem paramétrica nesta pesquisa atua como um meio de explicitação do saber tecnológico, o qual também contribuiu com elementos que explicitam o próprio saber teórico. A reunião de tais elementos de saber subsidiam a constituição de uma rede de conceitos da geometria complexa da arquitetura, com foco em superfícies curvas, voltada ao ensino de arquitetura.

Foi possível compreender que esses estudos aproximaram os estudantes de uma estrutura integral do saber ao conectar as lógicas presentes no processo de projeto, referenciais de arquitetura, teorias, técnicas e tecnologias das áreas envolvidas. Assim, instigaram os alunos a resolverem tarefas buscando o saber em sua estrutura mais integral e tornando-os mais autônomos em seu processo de aprendizagem.

2.9. Geometrias complexas da arquitetura

A evolução pelo qual o projeto arquitetônico permeia os meios digitais é notável e resulta na ocorrência de formas cada vez mais complexas nos projetos (STALS; JANCART; ELSEN, 2018). No entanto, a complexidade do projeto paramétrico não está atrelada à complexidade da forma final apresentada como solução, mas depende dos conhecimentos do programador (arquiteto) e das suas intenções por trás do projeto, uma vez que é possível diferenciar a complexidade das relações geométricas e da geometria gerada a partir delas (JABI ET AL., 2017). Os autores também explicam que uma solução geométrica complexa não exige que a programação tenha o mesmo nível de complexidade, da mesma maneira como uma forma simples também pode ter uma estrutura demasiadamente complexa por trás.

Quando se transpassa a parametria para a prática profissional nos escritórios de arquitetura é importante ressaltar que a tecnologia digital é uma abordagem facilitadora do processo de projeto, mas não é capaz de definir, tampouco ser responsável por mudanças nos estilos arquitetônicos (CELANI; BARBOSA NETO; FRANCO, 2018). Quando se projeta algorítmicamente é recorrente que exista um processo de definição formal que não é pensado com a intenção de resultar em uma forma revolucionária, inovadora e que atenda aos critérios da programação, mas sim as regras e definições que vão atender aos critérios do projeto (KATZ, 2010).

Apesar disso, Celani, Barbosa Neto e Franco (2018) complementam afirmando que a forma final é definida pelo arquiteto e não pelo meio digital, uma vez que os algoritmos e relações presentes na programação são resultados dos esforços do arquiteto. As formas complexas resultantes de processos focados em (exclusivamente) requisitos projetuais têm tomado espaço na arquitetura contemporânea, a partir de geometrias que deixam de ter o caráter retilíneo que até então configurava a maneira mais conhecida de se otimizar a estrutura e a superfície. Segundo Kolarevic (2005) essa quebra da linearidade não é um interesse repentino, mas reflexo dos avanços tecnológicos que aumentaram a possibilidade de representação no campo da arquitetura, pois tais formas eram limitadas pelos recursos tecnológicos até então disponíveis. Celani, Barbosa Neto e Franco (2018) corroboram com essa ideia ao afirmar que projetos paramétricos tornaram prováveis

os conceitos antes vistos como impraticáveis quando abordados de maneira manual tanto no processo de projeto como na fabricação.

Apesar de serem vistas quase como impraticáveis, Gaudí abordava tais geometrias complexas no desenvolvimento dos seus projetos por intermédio de métodos analógicos. Por anos o arquiteto espanhol avançou nos estudos de projeto juntamente com questões de mecânica da física para desenvolver arcos e abóbadas de diversos formatos (HUERTA, 2006). Foram seus conhecimentos matemáticas que permitiram compreender as geometrias utilizadas nos projetos, mas também propiciaram que o arquiteto desfrutasse do conhecimento necessário para a manipulação e aperfeiçoamento dessas formas (LORENZI; FRANCAVIGLIA, 2010).

Se por um lado Gaudí utilizou um processo de geração de formas durante o projeto da Colônia Guell, criando novos formatos para suas estruturas, quando começa a desenvolver o projeto da Sagrada Família ele direciona sua atenção não mais às novas geometrias, mas ao aperfeiçoamento do estilo gótico (HUERTA, 2006). Ainda para o autor, Gaudí estava interessado principalmente na otimização estrutural que poderia desenvolver, queria eliminar elementos estruturais apenas com a geometria da forma, fazendo com que esta resolvesse as questões de esforços (HUERTA, 2006). Com isso, Gaudí transitou por uma arquitetura paramétrica analógica tanto como um processo de geração de forma, como também um processo de otimização de uma forma já existente, cujas instâncias são resultantes de manipulações paramétricas

Buscar meios de otimizar a forma na arquitetura é uma atividade antiga, desde os primeiros modelos de arcos catenários das civilizações da Mesopotâmia até o emprego de modelos físicos experimentais como os de Gaudí ou por intermédio das tecnologias digitais mais atuais. O meio digital apenas permitiu uma maior recorrência dessas formas cada vez mais complexas nos projetos. A modelagem paramétrica tornou todo esse processo mais palpável, pois é uma abordagem de desenvolvimento de projeto que introduz maiores recursos (técnicas e algoritmos) para abordar as “novas” formas da arquitetura contemporânea.

As formas complexas estão no domínio e definição da geometria integrada ao processo de projeto arquitetônico, de tal maneira que sua recorrência na arquitetura contemporânea tem origem na facilitação de tais fatores a partir do meio digital.

Nesse sentido, a manipulação de formas complexas por meios digitais na arquitetura teve início com Frank Gehry, quando o arquiteto se apropriou do contexto industrial, em que os artefatos a serem fabricados tinham sua geometria configurada digitalmente a partir de modelos de malhas, e transpôs esta técnica para o projeto arquitetônico (POTTMANN; SCHIFTNER; WALLNET, 2008).

2.10. A geometria complexa e a aplicação de malhas na arquitetura

Na arquitetura, encontram-se exemplos de formas complexas definidas a partir da aplicação de geometrias resultantes de configurações em malha e que possuem diferentes atributos arquitetônicos, os quais se buscar-se-á sistematizar a partir do reconhecimento de tais atributos em exemplares de arquitetura. Porém, antes, faz-se necessário compreender a abordagem teórica integrada nessa aplicação, justificando a relevância das malhas frente à modelagem digital. Inicialmente, baseado no reconhecimento do conceito geométrico de malhas, a partir de Pottmann et al (2007) e Luo (2014), ampliou-se a revisão visando compreender as diferentes abordagens de cada contexto de pesquisa.

O primeiro contexto é de uma pesquisa que une as áreas da matemática e arquitetura, na qual Pottmann et al. (2007) conceituam uma malha como uma coleção de pontos (vértices) organizados em elementos básicos chamados faces, que são delimitadas por polígonos. Tais faces das malhas apresentam um tipo de polígono dominante (por exemplo, triângulo, quadrilátero ou mesmo hexágono) que se conectam por arestas comuns para descrever, aproximadamente, a forma de uma superfície.

O segundo contexto é da área da matemática integrada à área da computação, em que Luo (2014) não restringe as malhas a um conjunto de polígonos planos de qualquer tipo, mas um conjunto de triângulos conectados por meio de pares de arestas. Sendo assim, sua abordagem se concentra nas conexões entre as faces caracterizando o elemento geométrico 'arestas' para delimitar tais conexões. Sua definição considera a descrição geométrica de objetos que se configura com esta geometria triangular, devido à necessidade de simplificar os cálculos e facilitar o processamento computacional.

Pottman et al (2007) também destacam a importância dessa conectividade, que considera a importância de especificar os seus vértices e saber de que maneira

eles se unem para formar as arestas e as faces. Segundo os autores, malhas com exatamente a mesma conectividade podem ter formas muito diferentes, sendo alteradas a partir da modificação das coordenadas dos vértices (dentro de limites significativos) e mantendo-se todas as informações de conectividade (Figura 2.1 porção superior). Ainda destacam que quanto maior o número de faces, mais liberdade o arquiteto terá no design, o que pode tornar oneroso o trabalho de configuração da forma, mas que deve levar em conta a estética com um papel crucial. Na porção inferior da Figura 2.1, são apresentadas duas malhas que se aproximam de uma mesma forma, mas em que uma delas é muito mais equilibrada que a outra, segundo tais autores.

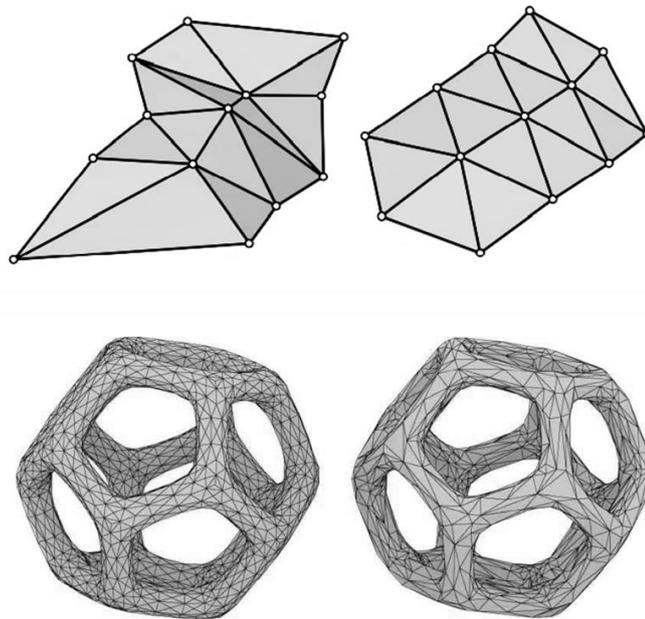


Figura 2.1 A conectividade das malhas. Porção superior: Malhas triangulares com a mesma conectividade, mas que representam formas geométricas bastante diferentes. Porção inferior: Duas malhas triangulares com a mesma forma, mas com uma conectividade muito diferente, o que influencia na aparência visual da malha.

Fonte: Pottmann et al (2007).

Então, mais importante do que os elementos que compõe a própria malha, Pottman et al (2007) e Luo (2014) valorizam a topologia das malhas, que, segundo Firby e Gardiner (2001), se refere a ideia de continuidade da superfície e a propriedade de manter as relações entre seus elementos, independente da deformação que ela possa sofrer. Enquanto Luo (2014) observa essa conectividade a partir das arestas, como um elemento de união dos polígonos, Pottman et al (2007) considera a importância de especificar os seus vértices e saber de que maneira eles se unem para formar as arestas e as faces.

Pottmann et al (2007) destacam alguns exemplos de malhas e seus usos na arquitetura com crescente popularidade em projetos recentes (Figura 2.2). Para os autores, o conhecimento geométrico em combinação com novos métodos de cálculo estrutural abre novas abordagens para a fabricação de superfícies de forma livre.

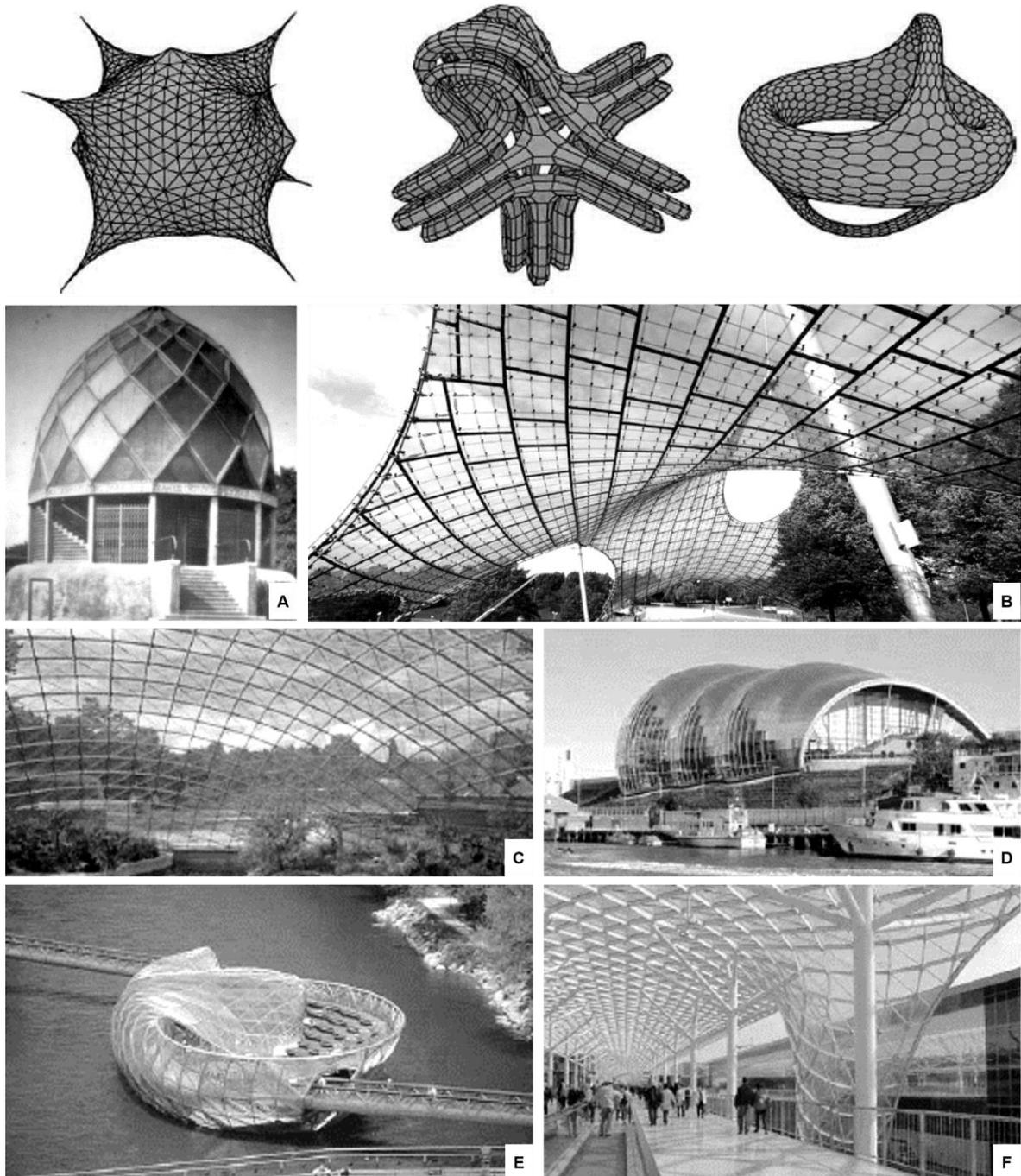


Figura 2.2 Exemplos de malhas e seus usos na arquitetura. Na primeira linha, malhas de diferentes tipos de polígonos: triangulares, quadriláteros e hexagonais. Na segunda, terceira e quarta linhas: (A) O Pavilhão de Vidro (1914) de Bruno Taut; (B) O Estádio Olímpico de Munique (1972) por Frei Otto; (C) O telhado de vidro da Hippo House (1996) no zoológico de Berlim por Schlaich Bergemann und Partner; (D) A Ilha Mur (2003) de Vito Acconci; (E) O Sage Gateshead (1994-2004) de Foster and Partners; (F) O telhado da Feira de Negócios (2002-2005) em Milão por Massimiliano Fuksas.

Fonte: Pottmann et al (2007)

Quanto à regularidade das faces, as malhas podem ser: regulares, sendo estas as malhas formadas pela combinação polígonos regulares (POTTMANN ET AL.; 2007; LIMA, 2021); irregulares, quando seus polígonos não apresentam uma repetição na forma (LIMA, 2021) e as malhas semi-regulares, que se apresentam como uma combinação de dois ou mais polígonos regulares (LIMA, 2021). Esta última pode ser vista no enorme telhado de vidro da feira comercial de Milão (2002–2005) por Massimiliano Fuksas (Figura 2.2 F), que combina elementos triangulares e quadrangulares.

Pottmann et al. (2007) e Lima (2021) apresentam triângulos, quadrados/retângulos e hexágonos como sendo as faces regulares capazes de configurar uma superfície totalmente preenchida. Isso porque a geometria desses polígonos tem a propriedade de composição geométrica com preenchimento integral do espaço, sem vazios, além de manter regulares o perímetro e os ângulos da malha (LIMA, 2021). Um exemplo é o Sage Gateshead (1994–2004) de Foster and Partners (Figura 2.2 E), um edifício cujo telhado é geometricamente uma malha quadrilateral. Já as malhas triangulares têm sido usadas na arquitetura sempre que superfícies de forma livre não podem ser facilmente planificadas de outra maneira (POTTMANN ET AL., 2007), como por exemplo recente a relativamente pequena ilha Mur (2003) em Graz por Vito Acconci (Figura 2.2 D).

Em relação às malhas irregulares, Lima (2021) as classifica em dois tipos de composições geométricas: a primeira delas é baseada no diagrama de Voronoi (Figura 2.3 B), geometria com uma organização espacial muito presente na natureza, que surge a partir de um conjunto de pontos que decompõe um plano em várias regiões (POTTMANN ET AL., 2007) e está presente na estrutura das folhas, asas de insetos ou organização celular. Essas regiões, exatamente pela referência da natureza, também são chamadas de células e são entendidas como a associação de pontos que apresentam a menor distância até um mesmo ponto do conjunto inicial (BURRY; BURRY, 2010).

Já a segunda organização irregular, denominada de Triangulação de Delauney (Figura 2.3 C), apresenta-se como a contrapartida do modelo anterior, pois deriva do mesmo conjunto de pontos. Enquanto o Voronoi é configurado pela região ao redor do ponto, a triangulação de Delauney surge da conexão dos pontos para definir triângulos nesse plano (POTTMANN ET AL., 2007). O autor também

especifica que essa geometria evita a criação de triângulos com ângulos muito pequenos, pois as arestas dos triângulos são resultados exclusivamente das conexões entre os pontos de células adjacentes do diagrama de Voronoi.

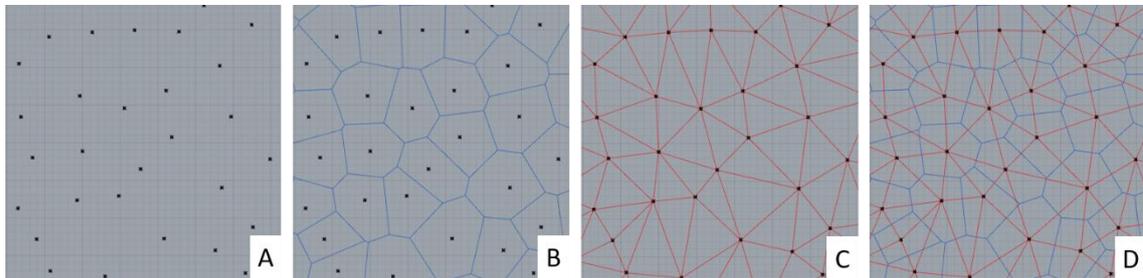


Figura 2.3 A: Conjunto de pontos que dá origem às conformações de malhas irregulares. B: Definição de um diagrama de Voronoi a partir do conjunto inicial de pontos. C: Triangulação de Delauney para o mesmo grupo de pontos. D: Sobreposição das duas organizações irregulares sob o mesmo conjunto de pontos.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 2.4 sistematiza-se em um esquema visual a classificação das malhas a partir dos conceitos delimitados até o momento.

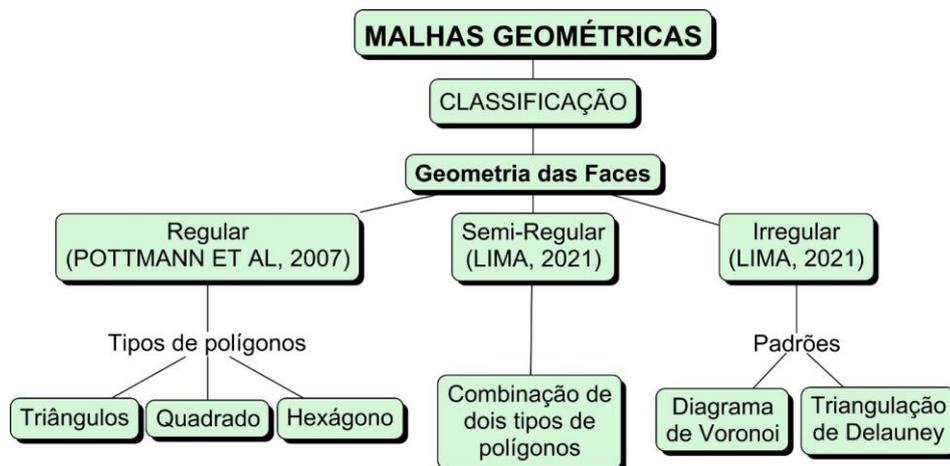


Figura 2.4 Classificação das malhas quanto à conexão e geometria das faces.

Fonte: Elaboração própria.

2.11. Aplicações das malhas na modelagem digital arquitetônica

Antoni Gaudí tinha um amplo domínio das formas que adotava em suas obras, devido ao seu profundo conhecimento matemático. Além disso, seu processo de projeto pode ser considerado pioneiro na abordagem paramétrica na arquitetura. O arquiteto dominava a geometria com excelência ao ponto de entender que a catenária (curvatura ideal de um arco que suporta apenas seu peso próprio, pois é gerada a partir de uma corda suspensa por suas extremidades), - quando invertida, seria capaz de trabalhar em compressão pura (LORENZI; FRANCAVIGLIA, 2010).

Nesse processo, a fim de criar, definir e aprimorar a forma que almejava para o projeto da Sagrada Família (trabalhou no projeto de 1883 até sua morte em 1926), o arquiteto construiu um modelo físico da catedral com o auxílio de malhas, estruturado por uma teia de cordas suspensas que deformavam a partir da força da gravidade. Além disso, o arquiteto controlava os parâmetros da geometria através de sacos com pesos variados pendurados nessa estrutura e com isso encontrava novas configurações geométricas que mantinham as propriedades estruturais das formas geradas.

Além de Gaudí, outro arquiteto conhecido por seus modelos em malhas é Frei Otto, que fundou o Instituto de Estruturas Leves de Stuttgart, Alemanha, em 1964. Seus modelos físicos também abordavam aplicação de forças para deformação da malha como método de geração da forma, antes mesmo do advento da modelagem computacional. A partir do estudo de conformações geométricas das bolhas de sabão, o arquiteto se apoiava em maquetes em diferentes escalas como ferramenta de projeto, calculando esforços e dimensão dos elementos (LIDDELL, 2015).

Com o avanço das tecnologias de representação e a transposição dos modelos físicos para os meios digitais, as malhas passam a ter um papel de destaque na modelagem e no contexto arquitetônico. Inicialmente foram utilizadas no setor industrial, mais especificamente o setor automobilístico, que manipulava chapas metálicas em formas curvas. Sua aplicação no projeto arquitetônico encontrava dificuldades, pois, além de serem difíceis de representar, a indústria da construção civil ainda não possuía mão de obra especializada para abordar tais geometrias complexas no canteiro de obras.

É apenas com F. Gehry que estas passam a ser introduzidas na arquitetura, devido a modelagem computacional. A equipe do arquiteto se apropria das malhas e da modelagem automobilística para modelar superfícies arquitetônicas por ser a tecnologia existente para a época, tanto em questões de representação como adaptação para tecnologias construtivas (POTTMANN; SCHIFTNER; WALLNET, 2008). Nesse contexto, as malhas apresentavam uma função bem definida na representação, eram elas são responsáveis pela conversão das geometrias complexas em formas elementares, ou seja, o modelo passa a ser manipulado a partir de polígonos triangulares para simplificar o processamento computacional (POTTMANN ET AL., 2007).

Uma das questões subjacentes à aplicação dos modelos de malhas no meio digital é a sua estrutura geométrica. Por ser composta por faces, arestas e vértices, a superfície poligonal baseia-se na conformação desses elementos de maneira a criar um sistema organizacional para a geometria digital (FLEISCHMANN; AHLQUIST, 2009). Ou seja, a superfície poligonal não é apenas um conjunto de polígonos arbitrários, mas sim uma sequência ordenada desses polígonos, adotando uma mesma lógica na identificação de cada um de seus pontos, de modo a identificar e diferenciar cada elemento do conjunto. Esse controle sobre a ordem das faces, arestas e pontos não tem um uso consciente por parte dos arquitetos, essa questão está presente como competência dos modeladores digitais e seu processamento na manipulação e controle dos elementos da malha.

Com a evolução das tecnologias digitais, juntamente com o desenvolvimento de novas técnicas construtivas, são manifestadas novas maneiras de representação de superfícies complexas junto à arquitetura. Conhecidas como “*Non Uniform Rational Basis Spline*” (NURBS), essas superfícies contínuas passam a ser exploradas na arquitetura contemporânea como uma alternativa na representação, já que são facilmente manipuladas mesmo sem a necessidade de conhecimento total da geometria da forma. Embora represente um avanço para os arquitetos este tipo de superfície, segundo Szalapaj (2005), ainda existem barreiras na modelagem, já que a complexidade da curvatura pode gerar buracos ou lacunas indesejadas, além de que as operações digitais de composição não garantem que o resultado mantenha o mesmo tipo de geometria. O autor ainda destaca que a liberdade formal, proporcionada por tais tipos de superfícies, pode levar a geometrias não desejadas, por isso considera a importância de os arquitetos estarem conscientes do que estão produzindo, ou seja, a estrutura da geometria arquitetônica.

A modelagem originada a partir de uma superfície contínua e posterior transformação em uma malha recebe o nome de tesselação (LIMA, 2021) e pode ter diversas justificativas: seja a compatibilidade construtiva, facilitar otimização estrutural ou puramente estética.

Os modelos representados a partir de malhas também permitem a busca de formas otimizadas tanto visualmente (PAN ET AL., 2016) como estruturalmente (FLEISCHMANN; AHLQUIST, 2009). As malhas podem sofrer uma reestruturação e reorganização da sua estrutura (técnica denominada ‘remesh’) ou uma mudança no

nível de subdivisão das faces (técnica denominada 'subdivide') com o intuito de se obter uma nova configuração de seus elementos para resolver e suavizar superfícies não convencionais (PAN ET AL., 2016).

Por outro lado, essas modificações também ocorrem como solução estrutural do projeto. O uso das superfícies poligonais em questões estruturais, seja diretamente para a configuração da estrutura de uma obra ou para a simplificação de cálculos de transferência de forças, possibilita que os esforços físicos fiquem diluídos por meio das arestas e que haja a otimização da forma (FLEISCHMANN; AHLQUIST, 2009). Nesses casos, o Método de Elemento Finito (FEM) é um método de cálculo estrutural que transforma objetos em malhas com o intuito de viabilizar a análise e o cálculo das forças atuantes, pois permite observar esforços em cada um dos elementos da malha (ALLISON, 2020). Sendo assim, a malha é usada para dividir um problema complexo em elementos pequenos, a partir de programas codificados com o algoritmo FEM.

Por fim, também é possível identificar o uso das malhas como solução na geração de formas arquitetônicas resultantes da aplicação de forças físicas. Conforme anteriormente descrito, um dos pioneiros na utilização deste método no processo projetual, por meio do desenho paramétrico em projetos analógicos, Gaudí, definia com as malhas um espaço de projeto em meio físico, caracterizado com técnicas de cálculo e simulação para a busca de formas complexas otimizadas (HUERTA, 2006).

No esquema visual da Figura 2.5 sistematizam-se as aplicações de malhas geométricas na arquitetura, como resultado da revisão de bibliografia.

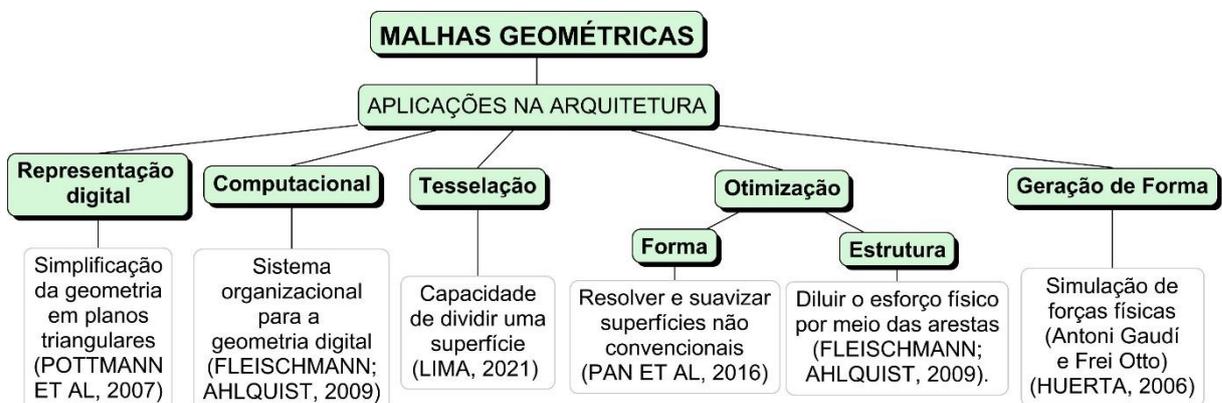


Figura 2.5 Tipos de aplicações das malhas na arquitetura.

Fonte: Elaboração própria

2.12. Uma estruturação prévia do saber e delimitação do corpo de análise

A partir da revisão de literatura, foram identificados conceitos, teorias, técnicas e explicações das mesmas (discursos tecnológicos), que indicam uma estrutura prévia do saber envolvido na aplicação de malhas na arquitetura. Tal estrutura, por ser capaz de explicitar as relações entre os seus elementos, aproxima-se da maneira que o desenho paramétrico é desenvolvido, além de oferecer elementos explícitos à prática projetual e sua representação por meios digitais.

No decorrer do desenvolvimento da revisão de literatura, identificou-se em exemplares de obras de arquitetura a presença desta estrutura inicial de conceitos geométricos de malhas e com isto foi possível selecionar os seguintes projetos como escopo desta pesquisa:

- O pavilhão Shellstar (Figura 2.6 A) que possui uma estrutura resultante da aplicação de forças físicas (MATSYS, c2022) sobre um modelo de malha. Segundo os responsáveis, o processo de desenvolvimento de projeto utilizado para a geração da geometria da Shellstar é o correspondente digital do método manual de Gaudí;
- O Estádio Olímpico de Munique (Figura 2.6 B), com uma inteiramente por esforços de tensão (BRITTO, 2012), suspensa por cabos de aço, sendo este um caso contrário à estrutura em compressão da Shellstar;
- A Biosfera de Montreal (Figura 2.6 C), projetada por Richard Buckminster Fuller, por sua importância histórica como primeiro projeto em malha construído com o conceito de geodésica (LANGDON, 2018);
- O Projeto Éden (Figura 2.6 D), por adotar uma malha hexagonal para simplificar e estruturar a geometria, sendo o equivalente digital para o método de bolhas de sabão de Frei Otto (EDEN, c2022);
- A cobertura do Museu Britânico (Figura 2.6 E), em que a malha é definida posteriormente no projeto, pois primeiro é gerada a forma e na sequência ela é aplicada sobre a superfície anteriormente criada, buscando-se a otimização da estrutura (BURRY; BURRY, 2010);
- O projeto do Centro Aquático Nacional de Pequim (Water Cube, Figura 2.6 F) tem sua origem em uma malha poliédrica, assumindo um volume,

com a intenção de preencher o espaço uniformemente (BURRY e BURRY, 2010). Uma obra que remete a uma malha configurada por diagrama de Voronoi, por este oferecer um caráter inovativo de projeto e se estabelecer como uma evolução das malhas regulares (PIETRONI ET AL., 2014).

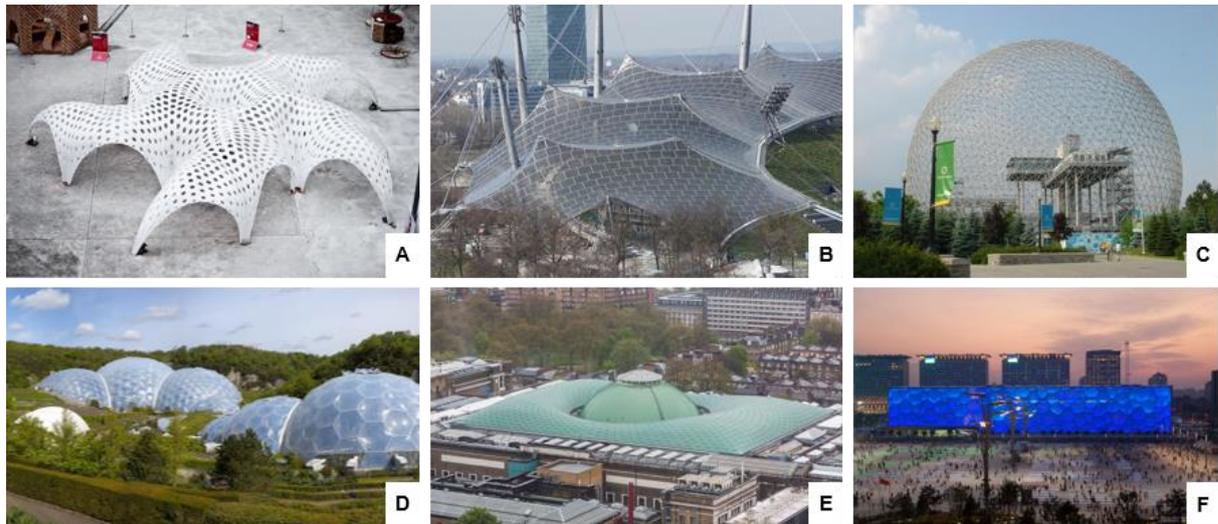


Figura 2.6 Obras selecionadas. A: Shellstar. B: Estádio Olímpico de Munique. C: Biosfera de Montreal. D: Projeto Éden. E: Cobertura do Museu Britânico de Londres. F: Water Cube. Fontes: Matsys (c2022), Janberg (2011), Wu (2005), Eden (c2022), Clarke (2013) e PTW Architects (2022). Acesso em: 21 de set. 2021

A partir dos autores que descrevem tais projetos, foi realizada a caracterização de cada uma das obras, tendo-se também por base os conceitos e propriedades identificados anteriormente na revisão. A Tabela 2.1 traz a classificação geométrica das faces das malhas em cada um dos projetos.

Tabela 2.1 Identificação das geometrias presentes nas faces das malhas em projetos de arquitetura.

		Análise dos projetos quanto a geometria das faces das malhas					
Geometria das Faces\Obras							
		Pavilhão Shellstar	Estádio Olímpico de Munique	Biosfera de Montreal	Eden Project	Cobertura do Museu Britânico	Water Cube
Regular	Triângulo						
	Quadrado						
	Hexágono						
Semi-Regular							
Irregular	Diag. Voronoi						
	Triang. Delauney						

Fonte: Elaboração própria. Imagens: Matsys (c2022); Britto (2012); Beauvois (2011); Eden (c2022); Foster+Partners (2022); Ziegler (2013). Acesso em: 21 de set. 2021

No primeiro projeto, o pavilhão Shellstar, a malha se caracteriza por apresentar faces predominantemente hexagonais, de acordo com a descrição fornecida por Matsys (c2022). Segundo Blanco (2022), a membrana de acrílico que cobre o Estádio Olímpico de Munique é constituída de elementos quadrados de 75x75cm. A Biosfera de Fuller é caracterizada por ter origem no icosaedro, mas suas faces foram fragmentadas em triângulos equiláteros, resultando em uma forma poliédrica percebida como curva e que se assemelha a imagem da esfera (LANGDON, 2018). No Projeto Éden, encontra-se uma malha hexagonal, mas que possui um pentágono ímpar para fechamento no topo (EDEN, c2022). A cobertura do Museu Britânico é construída como um conjunto de triângulos, porém estes não são iguais, obtidos através de processos de relaxamento e otimização da malha, como mencionado por Burry e Burry (2010). E, por fim, no Water Cube a fachada é marcada por uma malha tridimensional irregular, caracterizando a aplicação do diagrama de Voronoi (MICOOGULLARI, 2018).

Além disso, a Biosfera de Montreal e o Projeto Éden apresentam duas camadas de malhas, com geometrias distintas. Na Biosfera de Fuller, as faces são triangulares na parte externa, enquanto que sua estrutura interna apresenta uma configuração hexagonal (BOAKE, 2008). No Projeto Éden, a geometria das faces é inversa, tendo faces externas hexagonais e uma estrutura interna que combina triângulos e hexágonos (EDEN, c2022).

Depois da classificação inicial quanto à geometria das faces, uma análise de discurso dos responsáveis por cada uma das obras foi realizada para identificar as principais justificativas para o uso de malhas nesses projetos. Inicialmente os discursos destacam uma aplicação específica em cada obra, porém, ao longo das análises, observa-se a presença de outras aplicações, com justificativas implicitamente associadas. Ou seja, embora exista um uso mais significativo em cada um dos projetos, esses acabam sendo definidos por uma combinação de justificativas quanto à aplicação das malhas.

Com isso, ao sistematizar a classificação das malhas nos projetos (Tabela 2.2), reúne-se o conjunto de aplicações que englobam cada projeto. Esses resultados, embora sejam introdutórios em termos de estrutura de saber, já foram identificados em relação às definições das geometrias envolvidas em cada obra.

Tabela 2.2 Identificação das funções/aplicações das malhas em projetos de arquitetura.

Análise dos projetos quanto a função das malhas						
Aplicações\Obras						
	Pavilhão Shellstar	Estádio Olímpico de Munique	Biosfera de Montreal	Eden Project	Cobertura do Museu Britânico	Water Cube
Representação Digital						
Computacional						
Tesselação						
Otimização da Forma						
Otimização Estrutural						
Geração da Forma						

Fonte: Elaboração própria. Imagens: Matsys (c2022); Janberg (2011); Wu (2005); Eden (c2022); Clarke (2013); PTW Architects (2022). Acesso em: 21 de set. 2021

Conforme apresentado na Tabela 2.2, a utilização de malhas nos projetos têm diferentes justificativas e aplicações. O Projeto Éden e a cobertura do Museu Britânico empregam malhas como representação digital para simplificar a geometria. No caso do Projeto Éden, a geometria busca alcançar o formato de uma superfície mínima (Carmo, 1987) semelhante às bolhas de sabão, baseado nos estudos de Frei Otto (EDEN, c2022). Já a cobertura do Museu Britânico é, segundo Burry e Burry (2010), baseada em funções matemáticas que resultam em superfícies contínuas, mas são modeladas por meio de elementos menores para facilitar o desenvolvimento do projeto.

Em relação à função computacional, tanto a Shellstar quanto a cobertura do Museu Britânico utilizam malhas como um sistema de organização a partir da sistematização de seus elementos. Nesse sentido, suas malhas são constituídas por faces únicas, sem repetição e sobreposição de polígonos, que devem ser posicionadas de maneira precisa para compor a superfície (MATSYS, c2022; BURRY; BURRY, 2010).

A otimização da forma é realizada por meio da manipulação das malhas, utilizando técnicas para reorganizar seus elementos e alterar o comportamento das faces da malha, resultando em mudanças visuais do modelo (ZAVATTIERI; DARI; BUSCAGLIA, 1996). Na Biosfera, foi empregada técnica de refinamento da malha, aumentando a quantidade de faces (MATSYS, c2022; LANGDON, 2018), com o intuito de se aproximar de uma forma curva. Já na cobertura do Museu Britânico, além do controle da quantidade de faces, a posição dos pontos é ajustada para

alcançar uma suavização do conjunto de faces (BURRY; BURRY, 2010), ou seja, promover a continuidade da superfície.

No projeto do pavilhão Shellstar, a otimização da malha desempenha um papel fundamental na resolução de questões estruturais (MATSYS, c2022). Nesse caso, além do processo ser inspirado na abordagem de Antoni Gaudí que utilizou a força da gravidade como uma contrapartida digital para a formação da estrutura, também estão presentes processos de otimização de esforços da estrutura por meio da malha. No caso do Estádio Olímpico de Munique, a estrutura surge da aplicação de esforços de tensão na superfície, resultando em uma malha ondulada (BRITTO, 2012). Ou seja, a forma final é obtida por meio da aplicação de forças de tracionamento à malha, gerando a geometria desejada. No Water Cube, a malha utilizada tem origem no diagrama de Voronoi (BURRY; BURRY, 2010). Essa é uma abordagem de otimização estrutural baseada em padrões geométricos encontrados na natureza (POTTMANN ET AL., 2007), que confere uma aparência única à fachada do edifício.

Em relação à geração da forma, observa-se uma recorrência de técnicas que simulam a atuação de forças físicas nos projetos analisados. No caso da Shellstar, que apresenta a contrapartida digital do processo de Gaudí (MATSYS, c2022), a aplicação da força da gravidade resulta na conformação da malha e na definição da forma final. Da mesma maneira, no Estádio Olímpico de Munique, a forma da edificação é resultado da aplicação de forças por tracionamento da malha (BRITTO, 2012).

Essa revisão inicial permitiu identificar que as obras selecionadas apresentam diferentes aplicações das malhas, as quais já são reconhecidas na literatura. Essa análise inicial representa uma primeira abordagem das malhas em projetos paramétricos, proporcionando uma base de referência para a compreensão da complexidade da geometria e de sua modelagem. No entanto, é importante ressaltar que novas aplicações podem surgir ao longo da pesquisa, a partir do momento em que passam a ser explicitadas detalhadamente em cada uma dessas obras.

Capítulo 3

Metodología

3. Metodologia

Configura-se como uma pesquisa aplicada e exploratória, segundo os conceitos de Gerhardt e Silverira (2009), em razão de buscar questões além das soluções geométricas específicas das situações arquitetônicas, mas também favorecer um maior entendimento da geometria associado a requisitos projetuais, com intuito de evidenciar os conhecimentos nessa área e sua transposição ao ensino de arquitetura.

Inicialmente foi realizada uma revisão de literatura sobre malhas na arquitetura, reconhecendo-se suas características junto à geometria. Nessa etapa, destacaram-se as pesquisas em matemática de Pottmann et al. (2007), por aproximar a área da geometria com a prática arquitetônica. E, recorre-se a autores como Luo (2014) e Lima (2021) para relacionar as diversas abordagens e compreender sobre as malhas, suas diferentes finalidades e critérios para a aplicação. A partir deste reconhecimento, buscou-se selecionar previamente obras de arquitetura para compor o escopo da pesquisa. Isto porque o estudo visa abordar os conceitos geométricos em casos específicos, para demonstrar a relação entre o ensino e a prática profissional de maneira construtiva. Para isso, serão analisados os projetos identificados na etapa de revisão, reorganizando-se a apresentação da análise de cada projeto a partir da crescente complexidade geométrica das obras, devido à necessidade de, em processos de ensino, abordar níveis crescentes de complexidade.

Por ser uma pesquisa de caráter exploratório, a ordem de apresentação dos projetos só pode ser definida durante o processo de análise das obras. Inicialmente, identificou-se uma obra em que sua geometria é uma geodésica, a Biosfera de Montreal, de Buckminster Fuller, cujo conceito está relacionado à superfície esférica, sendo esta de fácil compreensão aos estudantes devido à relação com seus conhecimentos prévios, anteriores a formação em arquitetura. A pesquisa iniciará com a análise desta obra e terá continuidade com os demais projetos, que em um primeiro momento foram definidos como segue: o Éden Project, por Grimshaw Architects; o Estádio Olímpico de Munique, de Frei Otto; a cobertura Museu Britânico de Londres, por Foster and Partners; o Centro Aquático Nacional de Pequim, por PTW Architects da Austrália; e o Pavilhão Shellstar, de Matsys.

Adota-se, então, a noção estruturada de um saber, de Chevallard (1999), considerando-se o saber como um objeto dinâmico e passível de transformações conforme o contexto de sua aplicação. Buscou-se investigar o tipo de estrutura de saber presente associada ao emprego e importância das malhas na arquitetura, compreendendo-se não só o processo de projeto pelo qual cada obra passou, mas também os conceitos e termos referentes a estrutura geométrica dessas obras. A partir do discurso dos arquitetos responsáveis pelos projetos, sites e obras literárias de arquitetos e pesquisadores, propõem-se um esquema que representa a estrutura de saber teórica que corresponde com a concepção do projeto analisado. Nesse processo, se define a sequência dos principais elementos integrados ao projeto (geometria, estrutura, projeto, técnicas construtivas, materiais).

É pressuposto que a transposição do saber teórico para o saber ensinado - relativo à aplicação de malhas na arquitetura para configuração de geometrias complexas - pode se apoiar na explicitação dos conceitos e técnicas envolvidos na programação visual resultante do desenho paramétrico das obras arquitetônicas contemporâneas selecionadas. Então, a explicitação de tal estrutura de saber se apoia na estruturação dos processos de modelagem paramétrica dessas obras, para então se constituir como uma estrutura integral do saber.

Para transpor o saber teórico (esquematizado por meio de mapas conceituais) até o saber da modelagem paramétrica, estrutura-se um esquema visual e textual. Este traduz o discurso teórico para as técnicas de geração da geometria, ainda sem avançar para a programação visual, a qual em etapa posterior deve corresponder e se apoiar nas técnicas de geração previamente identificadas. Com isso, fica estabelecido o esquema que dará origem a programação visual subsequente.

No entanto, ao longo do desenvolvimento da pesquisa, decidiu-se limitar o corpo de análise, devido ao tempo restrito para o seu desenvolvimento e a característica do saber envolvido em alguns projetos. Isso porque são inerentes a outras áreas de conhecimento para além da arquitetura e representação gráfica, como ocorre com a obra do Museu Britânico, ou abordam a identificação prévia de funções semelhantes para o uso das malhas, como ocorre entre Estádio Olímpico de Munique e o Pavilhão Shellstar.

Além disso, é importante destacar que no decorrer do desenvolvimento do estudo buscou-se estabelecer relações entre as obras com base nos aspectos identificados na revisão e, para isso, identificaram-se dois fatores que justificam a importância de conectar o saber de cada uma delas. Primeiramente, as obras estão amparadas em uma estrutura de saber integrada, em que o conhecimento envolvido no projeto arquitetônico não é isolado em disciplinas separadas, mas sim constituído por uma rede de conexões entre abordagens distintas. Em segundo lugar, essa relação é fundamental para o projeto paramétrico, pois envolve a inter-relação e aproveitamento de elementos inseridos em um único projeto e entre projetos distintos.

Desse modo, identificou-se ao longo da etapa de análise das obras que Shellstar, Biosfera, Projeto Éden e Water Cube possuem esta inter-relação entre suas estruturas de saber. A partir de este reconhecimento, optou-se por limitar o corpo de análise a estes 4 projetos e iniciar as análises a partir da obra com menor complexidade em sua geometria, avançando em níveis crescentes para garantir uma sequência gradual em que o saber explicitado possa subsidiar as novas estruturas que integram as obras mais complexas, assim como aponta Chevallard (1999) em sua teoria da didática.

O primeiro projeto abordado é a Biosfera de Montreal, uma vez que sua forma - a geodésica - é referenciada em uma geometria mais elementar, a esfera e a geodésica. Em seguida, avança-se para o Projeto Éden, o qual foi concebido tendo como referência a própria Biosfera de Fuller, explorada como um conjunto de geodésicas interseccionadas, representando um agrupamento de bolhas. O terceiro projeto apresentado é o Water Cube, o qual assim como o Éden, tem seu conceito relacionado às bolhas de sabão. Porém, em vez de adotar a geodésica para representar seu agrupamento, o Water Cube é construído a partir de um modelo geométrico desenvolvido por Weaire-Phelan, caracterizado por um agrupamento de poliedros, que se destaca por apresentar um padrão Voronoi no conjunto das faces que definem a fachada.

Por fim, é apresentado o Pavilhão Shellstar. Este projeto foi estudado no segundo semestre de 2020 na disciplina “Análise e Representação de Superfícies Complexas da Arquitetura Contemporânea”, do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PROGRAU), da UFPel. A atividade final da disciplina

visava o estudo e representação de uma obra configurada com uma geometria em superfície mínima atuante em compressão e tendo princípios de estabilidade estrutural. Embora seja, cronologicamente, o primeiro projeto analisado, ele se difere dos demais por utilizar a técnica de aplicação de forças físicas em sua geração. Portanto, ela se caracteriza por uma estrutura de saber mais complexa para a arquitetura, por envolver a área da física e modelos de simulação digital. Por este motivo, este projeto será apresentado por último no estudo de referenciais.

É importante ressaltar que, ao apresentar o Pavilhão Shellstar, foram sistematizadas duas estruturas de saber. A primeira foi desenvolvida durante a disciplina em 2020, anteriormente as análises dos demais projetos. Em seguida, uma segunda abordagem foi explorada após compreender a estrutura da Biosfera, Éden e Water Cube. Isso permitiu avançar na análise do pavilhão e também observar sua relação com os demais projetos. Além disso, a partir dessa segunda abordagem, foi possível sistematizar a estrutura de saber do projeto de modo a se aproximar da geometria original.

A pesquisa fica caracterizada pelas seguintes etapas:

- 1) Revisão de literatura abarcando os temas geometria complexa, malhas na arquitetura e projeto paramétrico, na prática profissional, no contexto científico e no ensino (objetivo específico 1);
- 2) Definição do corpo de análise a partir da revisão de literatura (objetivo específico 1);
- 3) Análise do discurso dos projetistas de cada obra (objetivo específico 2);
- 4) Reconhecimento do processo de projeto de cada obra e explicitação da estrutura de saber a partir dos conceitos envolvidos nos projetos (objetivo específico 3);
- 5) Estruturação das etapas relativas ao processo de modelagem das obras de arquitetura com emprego de malhas (objetivo específico 3);
- 6) Desenvolvimento de um modelo paramétrico para cada projeto estudado, a partir da programação visual (objetivo específico 3);
- 7) Sistematização do saber reconhecido/explicitado por intermédio de esquemas visuais (objetivo específico 4).

Capítulo 4

Estudo da Biosfera de Montreal

4. A descrição da Biosfera de Montreal (1967)

Projetada inicialmente como um pavilhão temporário para a Exposição Mundial em 1967 e idealizada por Richard Buckminster Fuller, juntamente com Shoji Sadao e Geometrics Inc., a Biosfera de Montreal (Figura 4.1) tem sua estrutura geométrica baseada em uma esfera geodésica, com um diâmetro de setenta e seis metros e atingindo uma altura de sessenta e dois metros (MASSEY, 2016). Sua grandiosidade pode ser percebida pelo ambiente interno espaçoso que abrigou um prédio de sete pavimentos no interior da esfera para receber uma exposição de arte na época de sua inauguração.



Figura 4.1 Vistas da Biosfera em Montreal.
Fonte: Roletschek (2017); Nunes (2016^a); Nunes (2016^b).

O conceito para a Biosfera de Montreal tem origem no contexto social e filosófico abordado por Fuller (LANGDON, 2018). Segundo este autor, Fuller acreditava que somente os arquitetos eram capazes de entender e navegar pelas complexas inter-relações entre sociedade, tecnologia e meio ambiente, conforme o paradigma abrangente da teoria dos sistemas. A arquitetura, neste modelo, pretendia existir em contato próximo com a humanidade e a natureza, desempenhando o papel mais crítico da civilização em elevar o estado da humanidade e promover sua administração responsável do meio ambiente.

A partir disso, Fuller desenvolveu sua pesquisa da sinérgica, uma área do conhecimento que, segundo Bertol (2011), relaciona-se com uma condição geométrica e representa um sistema de interpretar as estratégias de matemática estruturais da natureza. Para a autora, esta abordagem destaca a emergência de um processo de pensamento integrante com abordagem holística. A sinérgica estuda a complexidade espacial, sendo a geometria a conexão entre a matemática e a realidade, de tal maneira que o arquiteto se utiliza da natureza como uma importante fonte de inspiração e também como uma maneira de obter conhecimento para além dos livros (EDMONDSON, 1987).

Apesar de os pensamentos de Fuller e suas deduções desencadearem diversos entendimentos que explicam conceitos que vão além do campo da matemática, autores atuais como Pottmann et al. (2007) e Bertol (2011) descrevem a importância de Fuller para a arquitetura a partir de seus estudos geométricos. Em especial, os conceitos relacionados aos domos geodésicos, geometria amplamente explorada pelo arquiteto durante sua vida e que começa a ganhar notoriedade a partir da visibilidade proporcionada com a Biosfera de Montreal. Segundo Langdon (2018), a obsessão de Fuller com as estruturas geodésicas surge do interesse com a eficiência material, integridade estrutural e modularidade, questões que acreditava serem indispensáveis para uma arquitetura sustentável e de fácil replicação.

Geodésica na arquitetura, segundo Kenner (1976), é uma técnica de criação de uma estrutura em concha capaz de suportar seu próprio peso sem a necessidade de colunas de sustentação, propriedade cuja fundamentação advém da combinação de forças nos três eixos direcionais. A elaboração de uma forma geodésica está relacionada com a intenção de agir como um sistema, fator que estabelece uma valiosa característica para a estrutura: a habilidade de transferir esforços locais, ou seja, as cargas acrescentadas serão transmitidas em toda sua extensão e compartilhadas por todos os elementos (KENNER, 1976). O autor descreve que esse princípio aponta uma grande economia de material – desejada por Fuller -, pois em vez de projetar uma estrutura cujos elementos são calculados para receberem novas cargas, o sistema assume os novos esforços como um todo. Com isso Kenner (1976) define que o estado normal dessa estrutura não é a rigidez, mas o equilíbrio.

Apesar do grande potencial dessa geometria apresentada por Fuller, Kenner (1976) acredita que, de forma geral, não existe uma grande presença das

geodésicas na arquitetura e isto está relacionado com a baixa acessibilidade ao saber matemático pelos arquitetos – ponto de partida para a obtenção de tais formas. O autor também aponta que a correta especificação e definição da sua geometria possibilita alcançar as seguintes metas muito desejadas por Fuller: reduzir material, peso e esforços da estrutura (KENNER, 1976).

As geometrias geodésicas têm sua origem em diferentes sólidos poliédricos (KENNER, 1976), mas são normalmente relacionadas àqueles conhecidos como sólidos platônicos devido a sua propriedade de regularidade (POTTMANN ET AL., 2007). Alinhado com esta ideia, Fuller estabelece o icosaedro – sólido regular formado por 20 faces de triângulos equiláteros e congruentes – como o ponto de partida para a geometria de seu projeto, isso por que o arquiteto encontrava peculiaridades no comportamento do sólido em relação aos demais. Dentre todos os sólidos platônicos, seu volume é o que mais se aproxima da esfera e, conseqüentemente, suas faces estão mais próximas da superfície esférica que o envolve (POTTMANN ET AL., 2007; EDMONDSON, 1987). Além disso, Kenner (1976) aponta que a geodésica com origem no icosaedro apresenta arestas com dimensões mais parecidas entre elas e os polígonos que compõem a geometria final são mais próximos de triângulos equiláteros, apesar de serem isósceles.

Para derivar a forma geodésica a partir dos sólidos platônicos, Pottmann et al. (2007) explica que cada uma das suas faces deve ser subdividida em um padrão triangular a ser projetado (Figura 4.2) na circunscfera - esfera que circunscribe o sólido. Com isso, a clareza geométrica do icosaedro é ofuscada pela fragmentação de suas faces durante seu processo de curvatura, pois os elementos menores criam uma complexidade visual a partir da repetição (LANGDON, 2018). Vale ressaltar, entretanto, que Pottmann et al. (2007) e Fuller, conforme comenta Edmondson (1987), afirmam que as geodésicas não podem ser construídas com triângulos equiláteros, devendo haver uma pequena diferenciação entre eles para que se construa a curvatura de maneira estável.

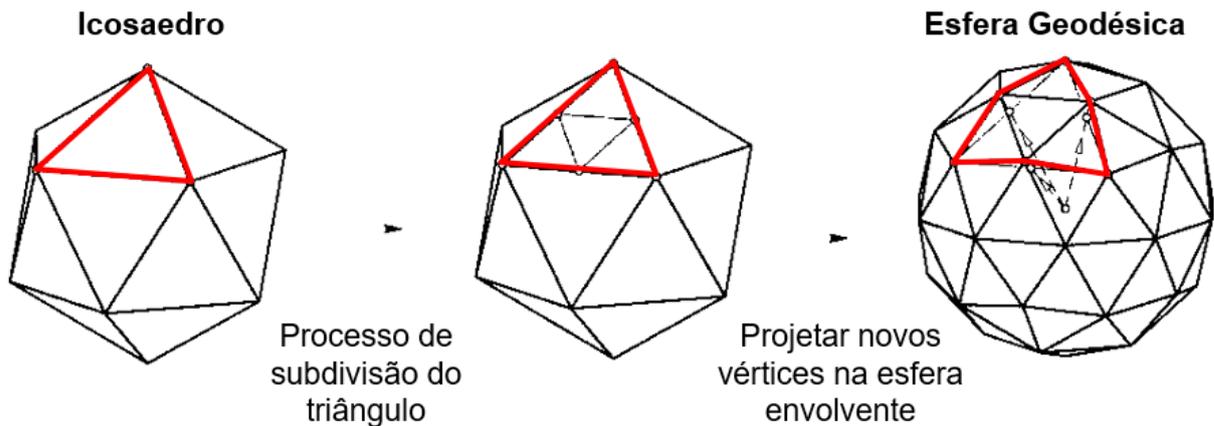


Figura 4.2 Processo de subdivisão das faces e projeção dos novos pontos.
Fonte: Pottmann et al. (2007).

A divisão das faces do icosaedro assume uma etapa importante nesse processo, pois quanto maior for essa subdivisão mais a geodésica vai se aproximar da superfície esférica. Nesse sentido, Pottmann et al. (2007) detalha essa técnica, iniciando pela construção do icosaedro, uma geometria com menor complexidade, avançando para etapas iterativas nas quais ele deriva uma fórmula para a definição da quantidade de polígonos (triângulos) presentes na forma final, que corresponde com as geodésicas de maior subdivisão das faces.

O autor começa explicando que um único triângulo equilátero (Figura 4.3 A), pode ser dividido em quatro triângulos também equiláteros (Figura 4.3 B), porém menores, apenas adicionando novos vértices no ponto médio de suas arestas. Depois é necessário inserir novas arestas, paralelas às iniciais, conectando cada um dos novos pontos e, com isso, obtém-se um total de 80 triângulos, pois cada uma das 20 faces do icosaedro é dividida em 4 novos polígonos. Com isso os pontos são projetados na esfera circunscrita ao icosaedro (processo que pode ser visto na Figura 4.2) para obter uma geodésica que Pottmann et al. (2007) chama de nível 1 (Figura 4.3 F).

Em um segundo momento a divisão da aresta do triângulo equilátero se dá em três segmentos e, da mesma maneira como a anterior, novas arestas paralelas às iniciais são inseridas para definir os triângulos da subdivisão, com um total de 180 triângulos, pois cada uma das 20 faces do icosaedro é dividida em 9 novos polígonos (Figura 4.3 C). Novamente os pontos são projetados na esfera que envolve o icosaedro para obter uma geodésica, dessa vez de nível 2 (Figura 4.3 G).

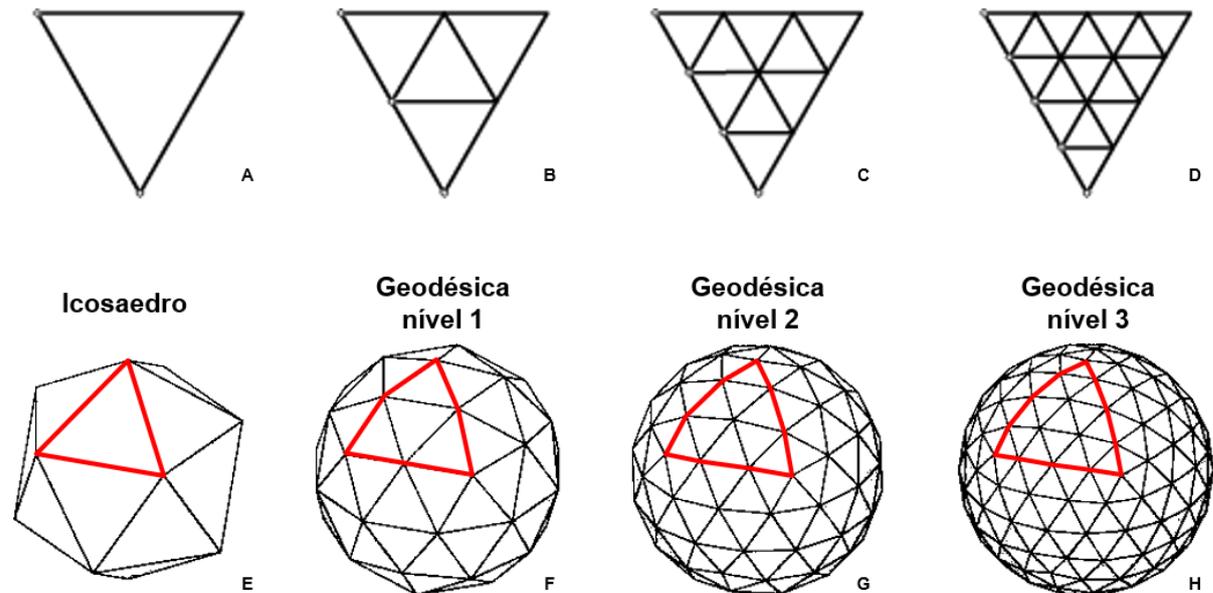


Figura 4.3 Subdivisão de um triângulo em triângulos menores (porção superior) e esferas geodésicas geradas a partir da projeção de tais faces.

Fonte: Pottmann et al. (2007).

Por fim, Pottmann et al. (2007) repete o processo, mas dividindo a aresta em quatro segmentos, com as novas arestas paralelas às que compõe o icosaedro, a fim de obter 320 triângulos, sendo 16 novos triângulos em cada uma das 20 faces do sólido (Figura 4.3 D). Nesse momento projeta os pontos e define a geodésica agora de nível 3 (Figura 4.3 H). Com isso o autor define uma fórmula para calcular a quantidade de triângulos: para uma geodésica de nível k , serão estabelecidos $20 \cdot (k+1)^2$ triângulos.

Enquanto Pottmann et al. (2007) caracteriza tais etapas como sendo o nível de uma geodésica, demais autores, como Langdon (2018) e Edmondson (1987), se apropriam do termo “frequência” para caracterizar essa subdivisão da geodésica. Porém, enquanto o nível da geodésica de Pottmann et al. (2007) está relacionado com as etapas das divisões da aresta original, a frequência é definida como número de segmentos resultantes dessa divisão da aresta (uma divisão resulta em dois novos segmentos, ou seja, nível 1 tem frequência 2). Na fórmula apresentada por Pottmann et al. (2007) “ $k+1$ ” representa o total de segmentos resultantes da divisão, pois uma aresta dividida uma vez ($k=1$), terá dois segmentos ($k+1 = 2$). Dessa maneira, sob a perspectiva da frequência geodésica, a quantidade de triângulos gerados em cada uma das faces do icosaedro está relacionada ao quadrado da frequência (f^2) (EDMONDSON, 1987), enquanto que a quantidade total será 20 vezes (número de faces do icosaedro) esse valor ($20 \cdot f^2$).

Quanto maior a frequência de uma geodésica, mais suave será sua superfície e menor será a diferença entre seus triângulos (KENNER, 1976), com isso é possível compreender a estratégia de projeto adotada na Biosfera de Montreal em que adotada uma geodésica de frequência 16. Como resultado, Fuller caracteriza uma geodésica com uma curvatura próxima à de uma esfera para os padrões da construção humana, ao mesmo tempo em que visualmente cria a percepção de repetição de um elemento único na fachada.

No entanto, a composição triangular visível na geodésica de Fuller é, segundo Massey (2016), apenas uma parte da estrutura, pois as treliças utilizadas na estrutura da Biosfera geram um padrão triangular na sua face externa, enquanto que internamente é percebido um mosaico hexagonal. Criadas inteiramente de tubos de aço de três polegadas e soldadas nas juntas, as treliças afinam suavemente em direção ao topo da estrutura para distribuir as forças de maneira ideal por todo o sistema (LANGDON, 2018).

Além disso, Massey (2016) relata a existência de uma camada intermediária em aproximadamente um terço dos hexágonos, formada por painéis acrílicos e persianas triangulares motorizadas que promoviam um sombreamento automatizado. Entretanto, esses elementos de fechamento que apresentavam maior opacidade e solidez à geodésica foram destruídos por um incêndio em 1976, restando apenas a estrutura metálica visualmente permeável (LANGDON, 2018). Segundo Massey (2016), a estrutura geodésica e o sistema de autorregulação do sombreamento, combinado com o ar condicionado controlado por um sistema termostático, foram propostas de Fuller para acelerar a economia de mercado americana. O autor percebe a combinação do sistema de sombreamento e do ar condicionado, ambos com acionamento automatizado, como a aproximação da Biosfera ao funcionamento do corpo humano, pois se autor-regulava para manter a temperatura interna constante. Nesse sentido, Fuller colocou em prática as questões de otimização que estudava com a sinérgica através de uma solução arquitetônica.

Apesar dos esforços de Fuller, segundo Langdon (2018), a capacidade de comunicação do arquiteto através da sua obra foi perdida, pois as suas reais intenções de otimização não eram percebidas por aqueles que, com dificuldade, lutavam para encontrar aplicações práticas para a invenção. Embora a forma do pavilhão da Expo 67 tenha se popularizado e começasse a aparecer geodésicas de

4.6) apresentada a geração do icosaedro a partir de uma primitiva, declarada no componente *Weaverbird's Mesh Icosahedron* – disponível por meio do plugin *Weaverbird* de Piacentino (2009) -, resultando diretamente em uma malha cujas faces são as faces do sólido platônico, visível na imagem à esquerda da Figura 4.7. Os parâmetros identificados nessa etapa da modelagem são o “raio do icosaedro”, ou seja, o raio da esfera que tangencia todos os vértices do sólido platônico, e o plano de inserção da geometria, o qual na obra corresponde com o plano padrão XY.

Depois parte-se para a definição da frequência da geodésica, etapa 2 ilustrada na Figura 4.6, em que se aplica um processo de subdivisão da face da malha, nos conceitos de Fuller e Edmondson (1987). Dessa maneira, para corresponder à geometria da Biosfera, as arestas iniciais do sólido platônico são divididas em dezesseis segmentos de retas menores e, de acordo com a fórmula da frequência, tem-se como resultado 256 triângulos (imagem à direita da Figura 4.7) em cada face e 5.120 no total (imagem ao centro da mesma Figura 4.7). Porém, ao repetir essa subdivisão para cada uma das faces do icosaedro, os vértices desses novos triângulos que se encontram sob a aresta original do icosaedro acabam resultando em elementos duplicados. Sendo assim, faz-se necessário mesclar esses vértices por intermédio do componente “*Weld*” para então obter uma malha sem sobreposições. O resultado da etapa 2 pode ser visto na Figura 4.7, apresentando a visualização do sólido inteiro e um detalhe da face do icosaedro com as subdivisões.

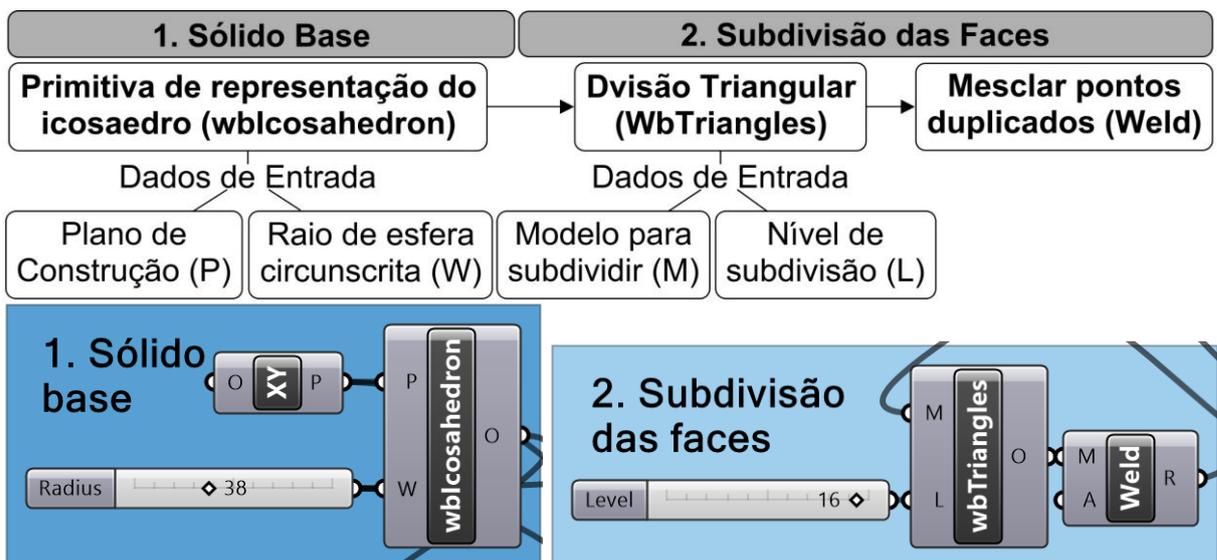
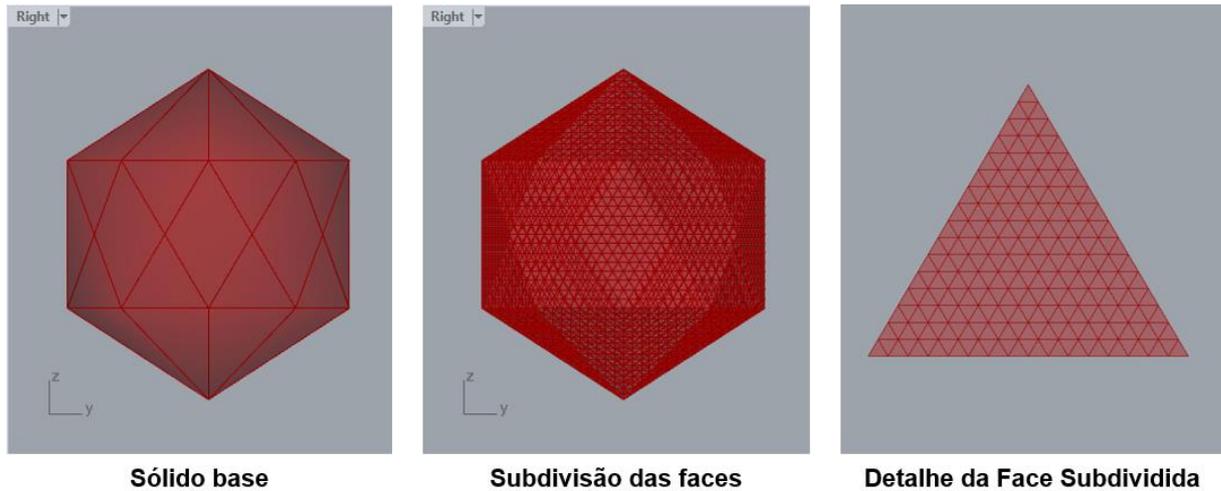


Figura 4.6 Esquema visual das etapas 1 e 2 da modelagem da Biosfera.
Fonte: Elaboração própria.



Sólido base

Subdivisão das faces

Detalhe da Face Subdividida

Figura 4.7 Representação gráfica das etapas 1 e 2 da modelagem da Biosfera.

Fonte: Elaboração própria.

Na sequência, é desenvolvida a etapa 3 (Figura 4.8) em que os novos vértices (dos triângulos oriundos da subdivisão) são projetados em uma geometria (a esfera que circunscreve o icosaedro). Para isso são extraídos os vértices da malha resultante da etapa anterior e se estabelece a direção da projeção para cada um desses vértices, a partir do vetor entre o centro do icosaedro/esfera até o próprio vértice. Depois se define a superfície que vai receber essa geometria, identificada na imagem à esquerda da Figura 4.9, para então efetivamente aplicar a projeção (imagem central da Figura 4.9). Ao fim da etapa 3 a malha é reconstruída a partir da nova posição dos vértices (imagem mais à direita da Figura 4.9) e mantendo constante as conexões entre eles, ou seja, a maneira como cada ponto se relaciona não é modificada no processo, apenas a posição espacial do elemento.

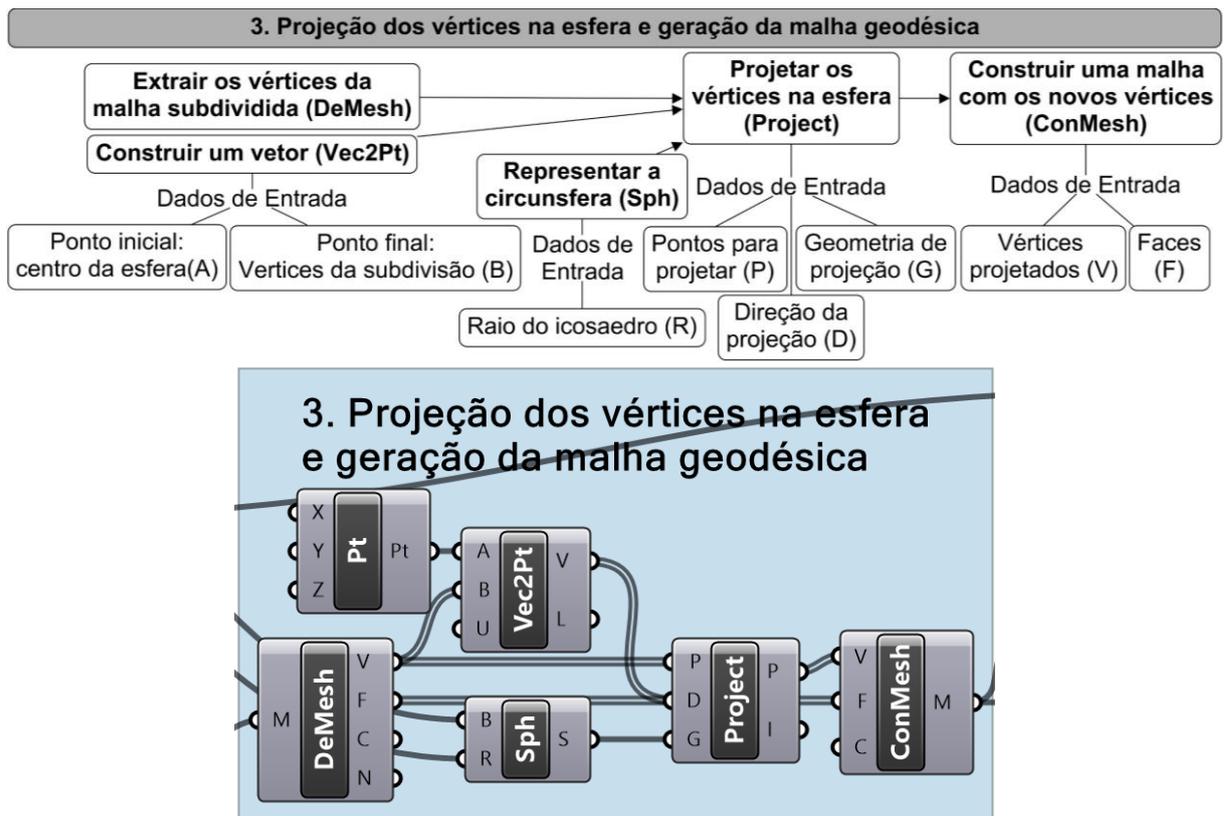


Figura 4.8 Esquema visual da etapa 3 da modelagem da Biosfera.

Fonte: Elaboração própria.

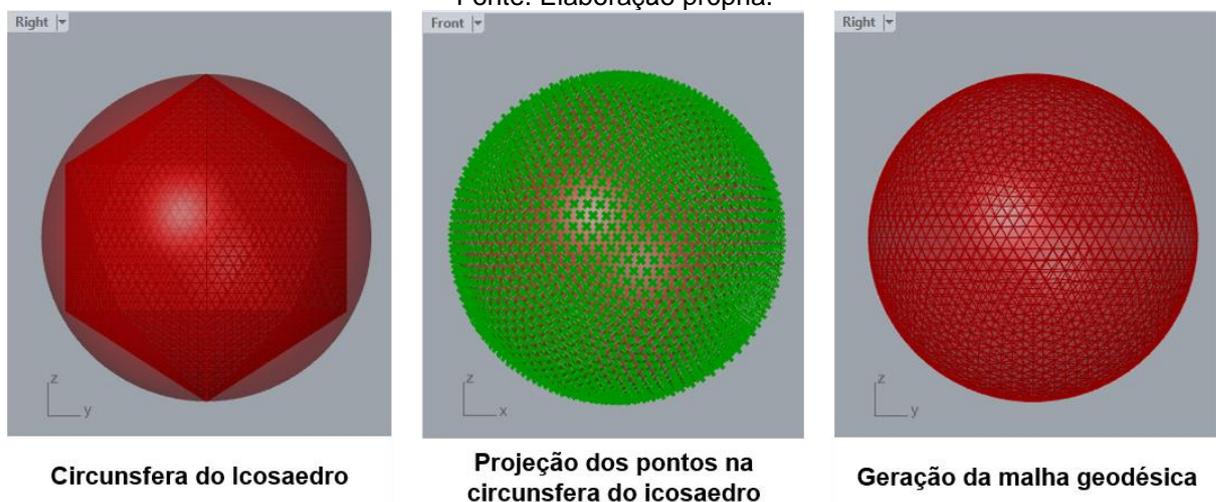


Figura 4.9 Representação gráfica da etapa 3 da modelagem da Biosfera.

Fonte: Elaboração própria.

Até este momento foi estruturada a malha que define a esfera geodésica inteira, porém Fuller projetou sua Biosfera de Montreal a partir de uma seção em sua parte inferior. Segundo Massey (2006), o arquiteto utiliza apenas três quartos (3/4) da altura da esfera e então apoia a seção circular no chão. Porém aqui há uma divergência entre o modelo paramétrico gerado e a obra construída. Na Figura 4.10, uma fotografia da obra, a porção A destaca as curvas que os triângulos configuram

nos extremos da esfera; a marcação B, mais ao centro, representa o conjunto de arestas que assume uma maior linearidade, já esperada para a forma, pois é a porção de vértices com a projeção mais próxima da horizontal (em relação ao centro da esfera); e o retângulo C destaca a porção da Biosfera que se distancia do modelo paramétrico desenvolvido, pois enquanto a obra de Fuller assume arestas tendendo para a horizontalidade, a geometria obtida no modelo se assemelha ao desenho destacado na porção A. Dessa maneira, aplicar uma seção na mesma proporção que o arquiteto propôs em sua obra resultará em elementos (faces e arestas) cortados, solução que não era parte da intenção de Fuller.

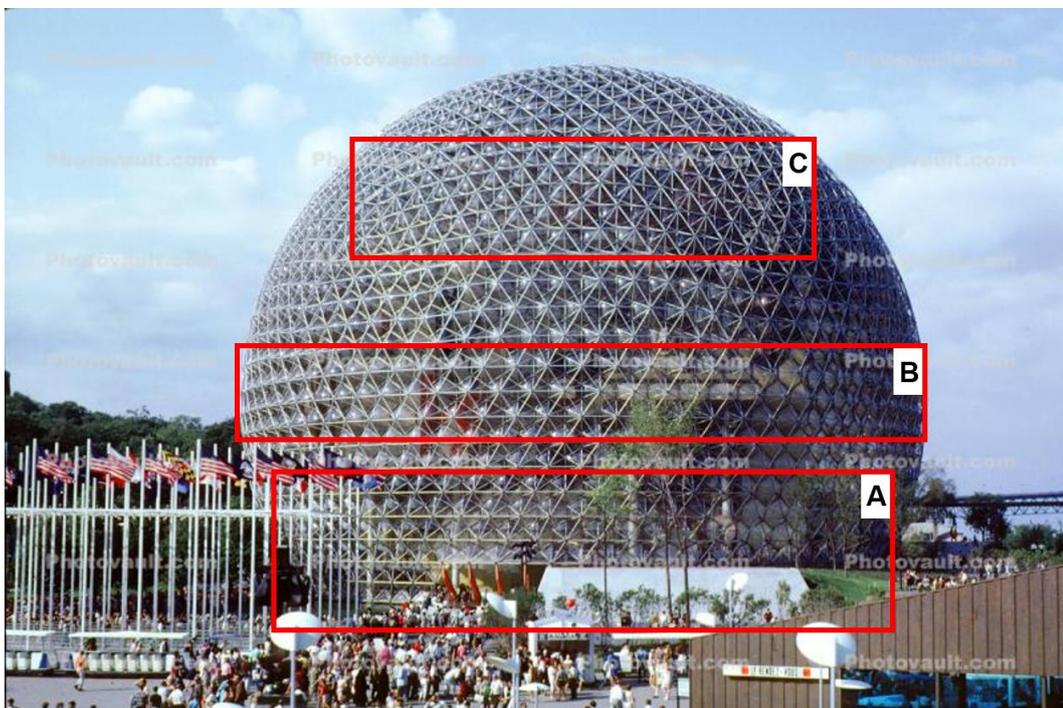


Figura 4.10 Fotografia da Biosfera de Montreal.
Fonte: Modificado a partir de Krutein (c2022).

Como não se encontraram registros oficiais do projeto quanto a solução adotada para obtenção da organização horizontal das arestas, e os materiais que descrevem o processo de Fuller não identificam essa etapa do processo, optou-se por uma solução alternativa que mantenha os contornos originais da geometria. Isso porque Fuller pensava a geodésica, na arquitetura, como um sistema de transmissão de forças, com isso, manter a integridade das arestas também preserva a propriedade que promove a estabilidade física da forma.

A Figura 4.11 ilustra a etapa 4 da modelagem em que se optou por definir uma seleção das faces que atinjam uma determinada altura, para preservar seus

contornos originais. Para isso, extrai-se o centro de cada uma das faces, decompõe-se este ponto em suas coordenadas e, conforme pode ser visto na imagem central da Figura 4.12, faz-se uma análise para verificar se a altura de cada um desses elementos está correspondendo à seleção de altura onde ocorreria a seção na Biosfera. Como o centro da geodésica está situado no plano XY cuja coordenada Z é nula, a porção inferior da geometria possui coordenada Z negativa. Então, o parâmetro que define numericamente a altura de seleção das faces é estipulado para “-24”, pois este é o valor (negativo) necessário para atingir a altura total de 62m da esfera geodésica. Com isso, são definidas as faces que compõem a obra (imagem central da Figura 4.12), sendo necessário remover as faces que não foram selecionadas.

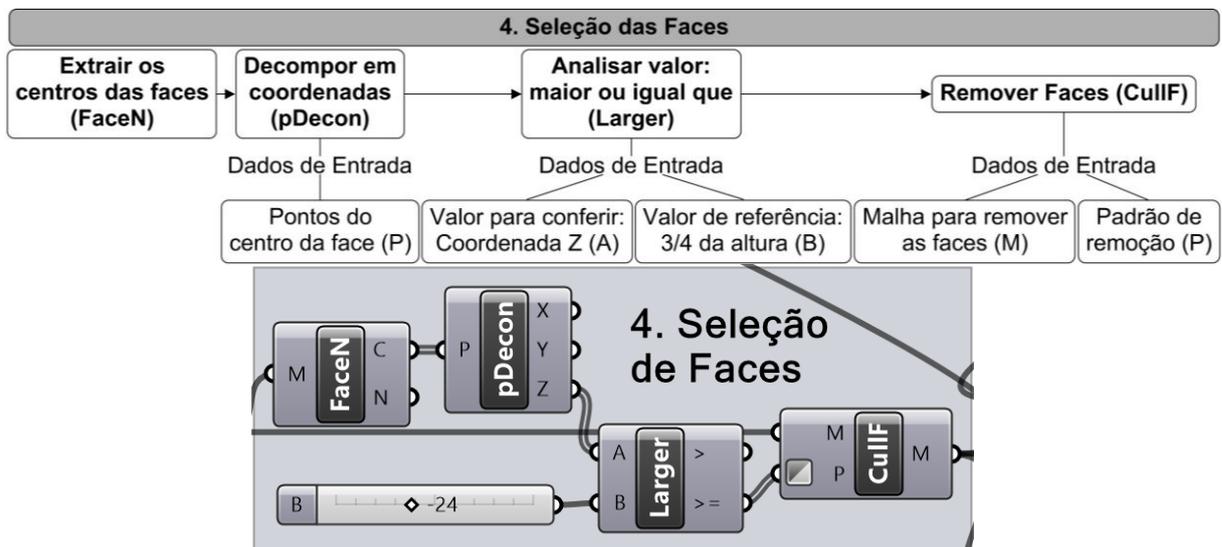


Figura 4.11 Esquema visual da etapa 4 da modelagem da Biosfera.

Fonte: Elaboração própria.

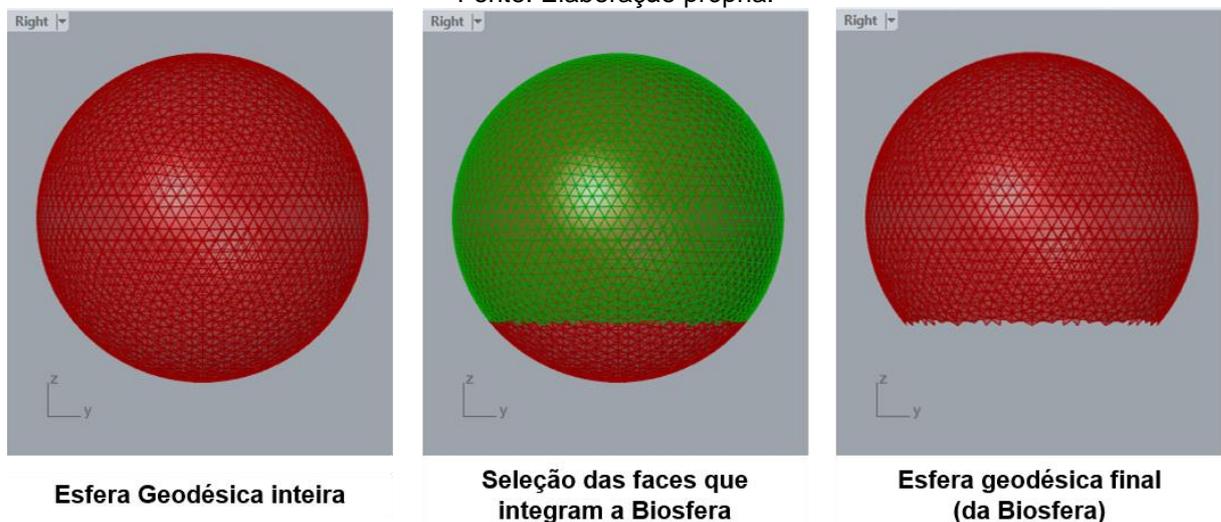


Figura 4.12 Representação gráfica da etapa 4 da modelagem da Biosfera.

Fonte: Elaboração própria.

Até este momento foi desenvolvida a modelagem da malha triangular que define a Biosfera. Porém, como os referenciais estudados que abordam a pesquisa de Fuller não especificam detalhes construtivos de suas obras arquitetônicas, pois são focados nos ensinamentos e teorias deixados pelo arquiteto, poucos autores abordam a malha de dupla camada da Biosfera. A existência de uma camada interna (hexagonal) não é citada, provavelmente para dar destaque à padronização triangular que está mais presente nos pensamentos de Fuller. Por entender que essa estrutura dupla hoje esteja mais aparente na fachada após o incêndio que atingiu a obra (devido a remoção do material opaco original) e também por compreender que sua aplicação esteja vinculada com questões estruturais, a modelagem paramétrica é investigada a partir dessa estrutura com as duas camadas de malhas, a triangular e a hexagonal.

Por não ter documentação detalhada sobre a estrutura de malha de dupla camada, para definir a malha hexagonal busca-se informações a partir de uma representação esquemática de corte do projeto (Figura 4.13). Partindo da dimensão conhecida do diâmetro da esfera (76m) e, fazendo-se uma relação de proporcionalidade dos elementos inseridos na imagem, é possível identificar a distância de 1,7m entre as duas malhas.

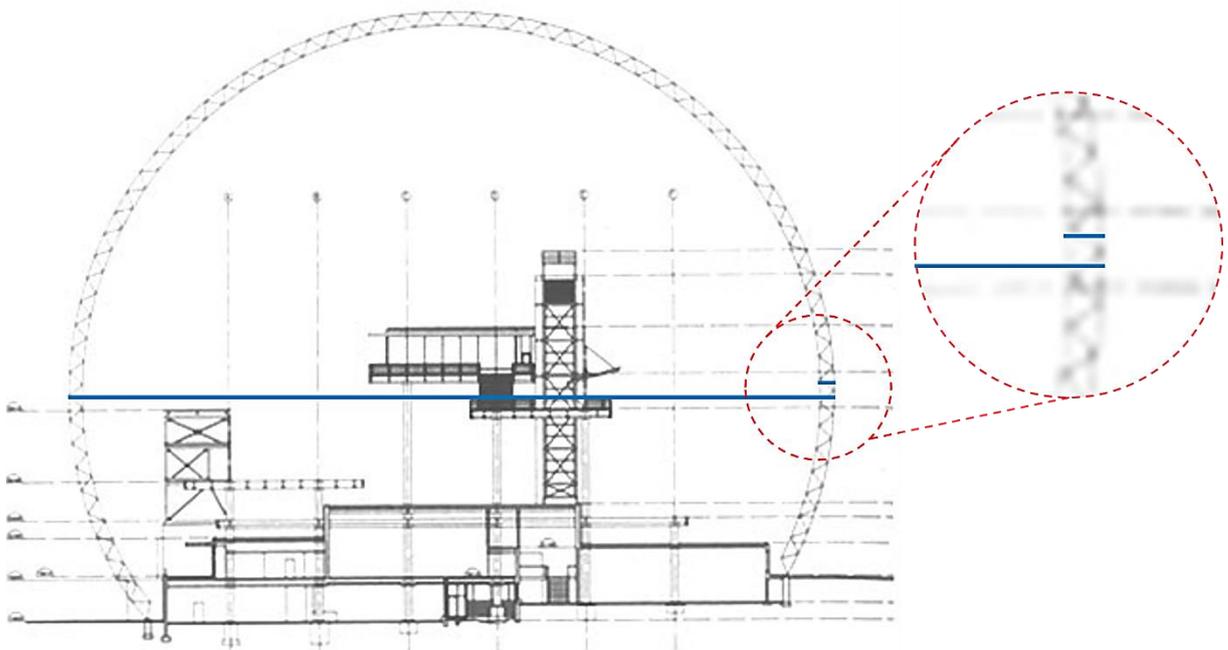


Figura 4.13 Corte esquemático da Biosfera de Montreal.
Fonte: Modificado a partir de Montreal (2016).

A Figura 4.14 apresenta a construção dessa segunda camada da malha. Na etapa 5.1 é definida a modelagem da malha interna com base na seleção de faces da etapa anterior e a projeção de seus vértices em uma esfera com raio 1,7m menor que a anterior. Esta etapa pode ser vista na imagem à esquerda da Figura 4.15 que apresenta a camada interna (ainda triangular) destacada em verde. A modificação das faces triangulares em hexagonais ocorre a partir da adaptação do conceito de dualidade que Pottmann et al. (2007) define para os sólidos platônicos: o ponto central de uma face (polígono) é o vértice da sua face (polígono) dual (imagem central da Figura 4.15). Essa transformação está caracterizada na etapa 5.2 por intermédio do componente “Dual” - disponível no plugin *NGon* de Vestartas e Rad (2021) - que gera os hexágonos como faces “*NGon*” de malhas – são faces que adotam como base polígonos com mais de 4 lados. Estas não podem ser geradas diretamente no *Rhinceros*, pois este possui somente a representação de malhas com faces triangulares e quadrangulares. Ou seja, o *NGon* é a face hexagonal da malha, mas para o *Rhinceros* é entendido como um conjunto de 6 faces triangulares e planas.

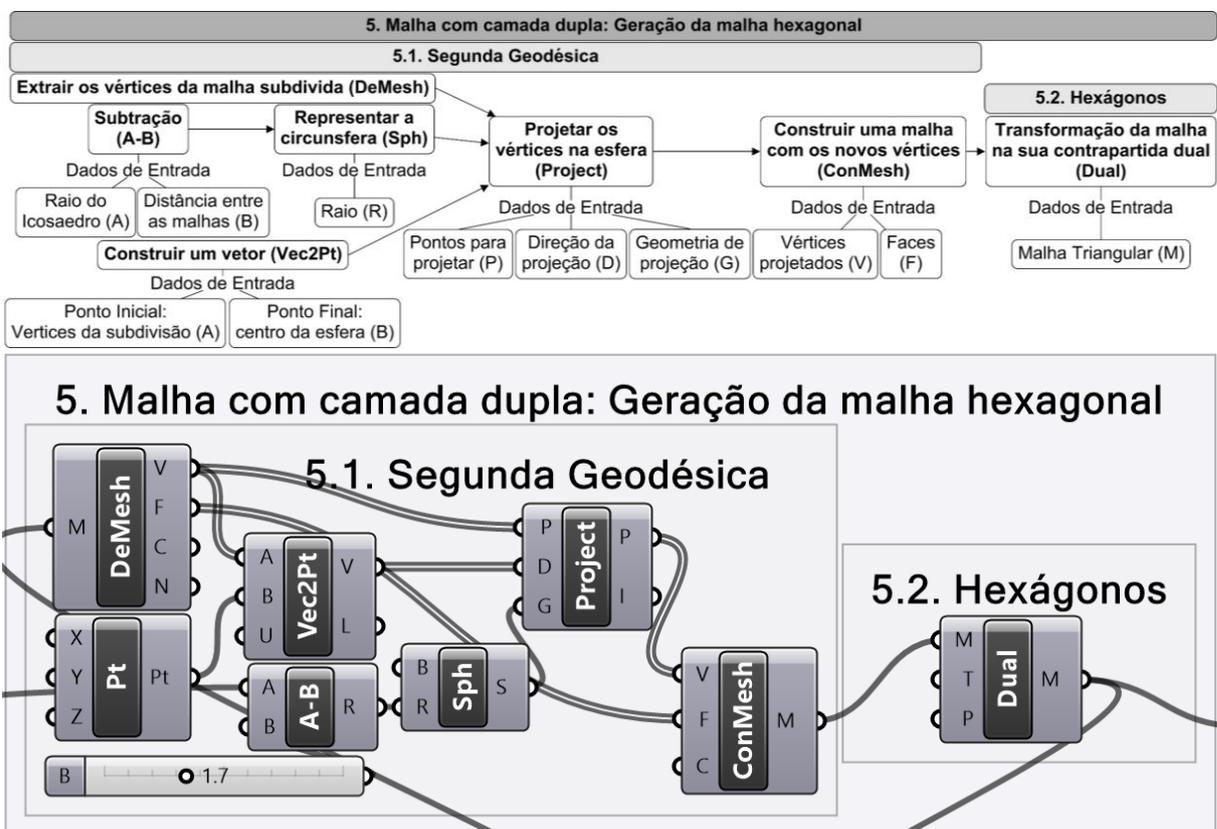


Figura 4.14 Esquema visual da etapa 5 da modelagem da Biosfera.

Fonte: Elaboração própria.

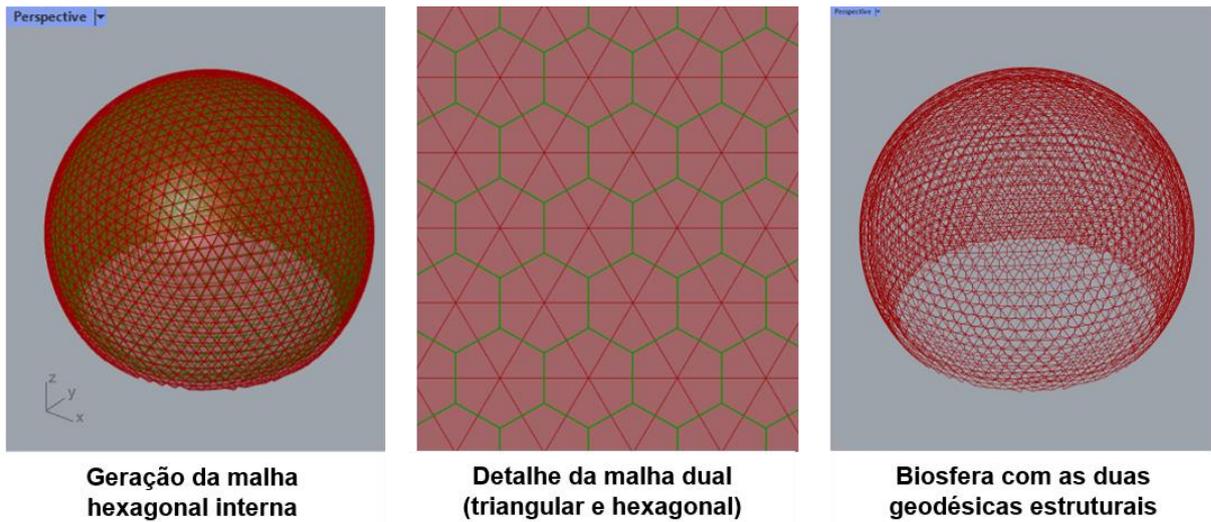


Figura 4.15 Representação gráfica da etapa 5 da modelagem da Biosfera.
 Fonte: Elaboração própria.

Com os dois domos geodésicos definidos (imagem à direita da Figura 4.15), passa-se a buscar a conexão entre eles. A fotografia da estrutura da obra, Figura 4.16, demonstra que a conexão entre as malhas ocorre por meio de arestas com origem nos vértices dos hexágonos que se juntam em cada um dos vértices dos seus triângulos duais.

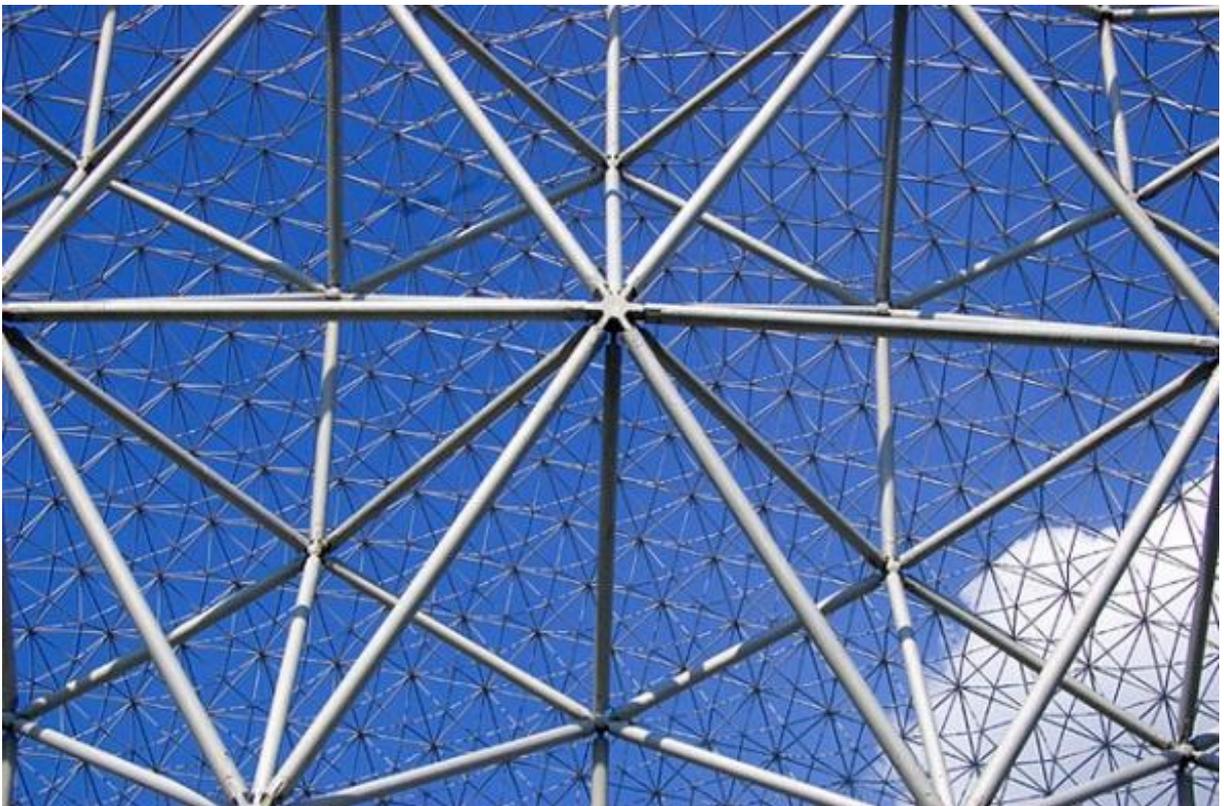


Figura 4.16 Detalhe de conexão entre as duas camadas de malhas.
 Fonte: Brown (2006).

O processo de extração dos vértices de cada uma das malhas e posterior conexão entre eles caracteriza a etapa 6 da modelagem e pode ser visto na Figura 4.17. Faz-se necessário decompor cada uma das malhas com um componente diferente, uma vez que elas foram construídas a partir de diferentes plugins. Os vértices da malha triangular, por ser a abordagem padrão do *Grasshopper*, são obtidos com o componente *DeMesh*. Já a malha hexagonal, por se tratar de faces geradas por *NGons*, tem sua decomposição realizada pelo componente *NGFaceVertices*, o qual extrai os vértices apenas dos *NGons* (hexágonos).

E, por fim, a Figura 4.17 apresenta o esquema do processo de modelagem paramétrica dessa geometria, que anteriormente era visível a partir das linhas das arestas e que passa a ser construída com uma superfície cilíndrica ao redor dessas retas, garantindo uma espessura e tridimensionalidade para os elementos de conexão. Em vermelho está destacada a malha triangular, em verde a conexão entre as malhas e em azul a malha hexagonal interna. A Figura 4.18 ilustra, respectivamente, um detalhe da estruturação da malha em vista frontal, o modelo final e um detalhe da composição da malha, ambos em perspectiva.

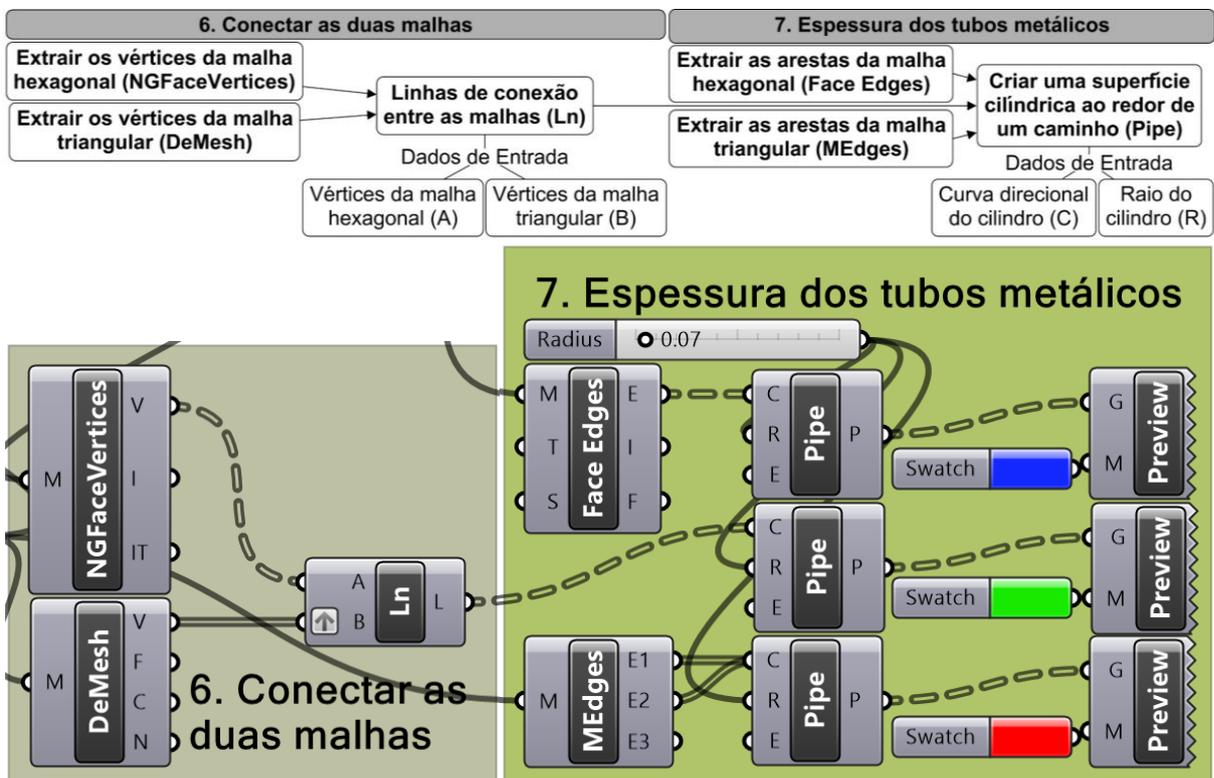


Figura 4.17 Esquema visual das etapas 6 e 7 da modelagem da Biosfera.

Fonte: Elaboração própria.

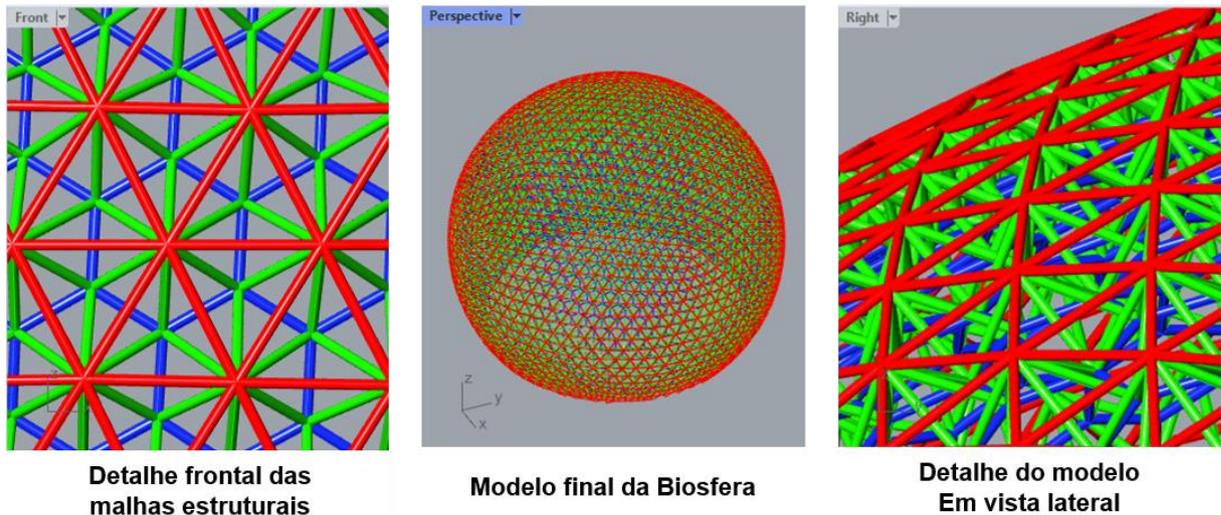


Figura 4.18 Representação gráfica das etapas finais da modelagem da Biosfera.
Fonte: Elaboração própria.

4.2. Revisão das classificações quanto ao tipo de face e função da malha na Biosfera de Montreal

A partir da estrutura de saber e, principalmente, da modelagem paramétrica da obra, busca-se sistematizar a estrutura de saber identificada neste capítulo. Nesse sentido, são observadas as classificações da malha presente na Biosfera de Montreal em relação à geometria das faces e à justificativa do uso das malhas. Para isso, é feita uma comparação entre os conceitos previamente identificados na etapa inicial de revisão de literatura e aqueles identificados ao longo do estudo da obra.

No decorrer desse estudo, foi confirmada a classificação da geometria das faces da malha como sendo triangular, quando observada externamente (destacado em azul na Tabela 4.1). Já se havia identificado a presença da segunda camada hexagonal na geodésica, porém, foi apenas com a análise do projeto que se reconheceu a importância dessa camada na obra. Então, avança-se no saber identificado e considera-se a estrutura mais complexa. Desse modo, além da camada já conhecida, também foi destacada (em verde) na tabela a classificação hexagonal da malha presente na Biosfera, devido a sua importância estrutural. Então, a Biosfera apresenta duas classificações quanto às faces, uma para cada camada de malha.

Tabela 4.1 Classificação da Biosfera de Montreal quanto à geometria das faces da malha.

Geometria das Faces na Biosfera de Montreal			
		Inicial	Pós Est. do Saber
Regular	Triângulo		Camada Externa
	Retângulo		
	Hexágono		Camada Interna
Semi Regular			
Irregular	Diag. de Voronoi		
	Triang. de Delauney		

Fonte: elaboração própria.

Quanto à função das malhas, foram identificados novos usos que justifiquem sua aplicação no projeto. Nesse sentido, na Tabela 4.2 é destacada em azul a função prevista inicialmente, de otimização da forma, e em verde os novos usos identificados, de tesselação e otimização estrutural. Conforme já visto anteriormente, a tesselação representa o processo de transformação de uma geometria em malha; a otimização estrutural ocorre quando as questões de análise e simulação de esforços da estrutura se dão pelas propriedades da malha; e a otimização da forma é o processo que identifica o uso da malha como ferramenta para modificações na forma do projeto.

Tabela 4.2 Função da malha na Biosfera de Montreal.

Função das Malhas na Biosfera		
	Inicial	Pós Est. do Saber
Representação Digital		
Computacional		
Tesselação		
Otimização da Forma		
Otimização Estrutural		
Geração da Forma		

Fonte: elaboração própria.

A tesselação é parte fundamental do processo de geração da geodésica, geometria característica da Biosfera. Nela o icosaedro, um prisma, é transformado em malha para ter suas faces subdivididas. Então, embora não haja confirmação verbal desse processo pelo responsável do projeto, entende-se que há essa função junto ao projeto. É uma etapa importante para o desenvolvimento da geodésica, que integra o segundo uso da malha: a otimização da forma. Nesse sentido, a malha

passa por um processo de refinamento para aumentar o número de faces, pois quanto maior a quantidade de elementos triangulares, maior será a aproximação com o formato da esfera. Por fim, em relação a otimização estrutural, pode-se dizer que a malha presente no projeto desempenha o papel da própria estrutura e que a adoção da dupla camada de malha torna essa estrutura mais eficiente, acrescentando a terceira aplicação da malha ao projeto.

4.3. Análise e discussão de resultados

A ideia inicial de Fuller com a Biosfera de Montreal foi de transformar seu projeto em um modelo para a difusão da sinérgica, no entanto, diversos autores consideram a geometria o seu maior legado com a obra. Apesar disso, a Biosfera ainda esconde uma estrutura de saber que nem sempre está explícita junto aos materiais que abordam os pensamentos do arquiteto. Enquanto que no primeiro momento desse capítulo se descreveu uma estrutura teórica referenciada em autores que abordam a pesquisa de Fuller, foi necessário avançar para um modelo paramétrico que aproxima o saber da prática arquitetônica. Ou seja, inicialmente a Biosfera de Montreal se apresenta como uma figura geométrica elementar frente a tantas outras formas complexas que a arquitetura contemporânea tem explorado, mas que carrega uma gama de conceitos geométricos implícitos em sua estrutura.

Essa estrutura de saber evidenciada é uma abordagem geométrica da arquitetura, a qual além de subsidiar a prática profissional da área, passa a ter potencial para a formação ao ser abordada nas atividades de projeto dos cursos de graduação assim como em outras disciplinas. E dessa maneira, formar profissionais capazes de referenciar os conceitos e justificativas que definem a geometria que integra a forma. Esta abordagem, associada à estrutura de saber presente nas tecnologias digitais de representação, tal como a modelagem paramétrica, a qual se desenvolve por meio de uma lógica computacional, permite avançar no campo conceitual para também aproximar-se dos conceitos geométricos atrelados à prática projetual, por meio de soluções não triviais quando realizadas em processos analógicos de projeto.

A estrutura geométrica adotada por Fuller, a geodésica, possibilitou que o arquiteto materializasse a figura de uma esfera para o seu projeto. Ao buscar representar essa geometria, almejava também atingir um maior volume para uma menor superfície e assim criar um grande espaço arquitetônico para inserir seus

ideais no interior da Biosfera. Essa forma possui um desempenho estrutural que viabilizou a construção da obra, pois a própria geometria da geodésica é responsável pela transmissão de forças - ao dissipar a energia em todas as direções. Combinado a isso, destaca-se a aplicação da malha nesse processo, pois foi a dupla camada da malha a responsável por manter a estabilidade da estrutura do projeto – sem a necessidade de apoios adicionais. Então, adotar essa forma e abordá-la a partir da malha (dupla camada) garante uma estrutura com ótimo desempenho, gerando um espaço amplo e sem a necessidade de apoios para a estrutura.

A abordagem de Fuller ao desenvolver um projeto temporário para uma exposição arquitetônica foi concentrada em esforços para demonstrar ao mundo a viabilidade e potencial de uma arquitetura sustentável. Em um momento em que a arquitetura buscava explicitar os avanços tecnológicos, Fuller foi responsável por se apropriar e desenvolver, na arquitetura, uma proposta de conscientização. Para ele, os arquitetos são responsáveis por promover essa mudança de paradigma no mundo todo, modificar o pensamento arquitetônico para evitar desperdício. E aqui não considerava apenas o desperdício de material, mas até mesmo de iluminação e temperatura, relacionando a sua proposta ao controle do conforto dos usuários, de maneira a promover a sustentabilidade.

Em vista da exigência cada vez mais de a arquitetura alinhar-se com as questões ambientais e econômicas, intrinsecamente relacionadas uma à outra, é necessário que a formação em arquitetura abarque tais questões em um campo interdisciplinar. A área que envolve o ensino de representação gráfica digital não deve ficar fora deste processo e pode contribuir com uma formação mais integrada a tais questões. Importante então compreender que a mesma estrutura de saber, que é dirigida a formação em representação, pode também integrar conceitos que envolvam a concepção de projetos que terão algum tipo de performance que diminua o impacto do custo dos materiais e propicie um satisfatório desempenho do objeto arquiteto ao longo de sua vida útil.

Capítulo 5

Estudo do Projeto Éden

5. A descrição do Projeto Éden

A importância do Projeto Éden está no momento em que foi inaugurado, em 2001, sendo considerado um dos maiores projetos britânicos do milênio (KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, 2002). Projetado por Nicholas Grimshaw and Partners (NGP) e engenheiros da Anthony Hunt Associates (AHA), o conjunto de biomas do Projeto Éden (Figura 5.1) é a maior estufa do mundo (LARSEN; TYAS, 2016) e, juntamente com sua área externa de 15 hectares, exhibe vegetações de diferentes zonas climáticas (KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, 2002). Localizado em Cornwall, na Inglaterra, recebeu quase dois milhões de visitantes nos primeiros anos de inauguração e hoje é considerado, no Reino Unido, o segundo destino mais visitado fora de Londres (GRIMSAHW, 2022).



Figura 5.1 Vista aérea do Projeto Éden, em Cornwall, na Inglaterra.
Fonte: Burton (2010).

Apesar da extensa área externa, o complexo contava com apenas quatro edificações na época de sua inauguração. Segundo Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002), a primeira a ser construída é o centro de visitação, entrada para todo o complexo, que se localiza na parte mais alta do terreno e agrupa atividades como loja de souvenir, restaurantes e exibições. Os outros três edifícios juntos constituem a construção principal do complexo e podem ser vistos na Figura 5.2: a maior das estufas abriga os Biomas de Trópico Úmido (A); após, o edifício de ligação que é quase invisível na superfície devido à sua cobertura revestida com grama (B); e por fim, a estufa que abriga os Biomas de Temperatura Quente (C).

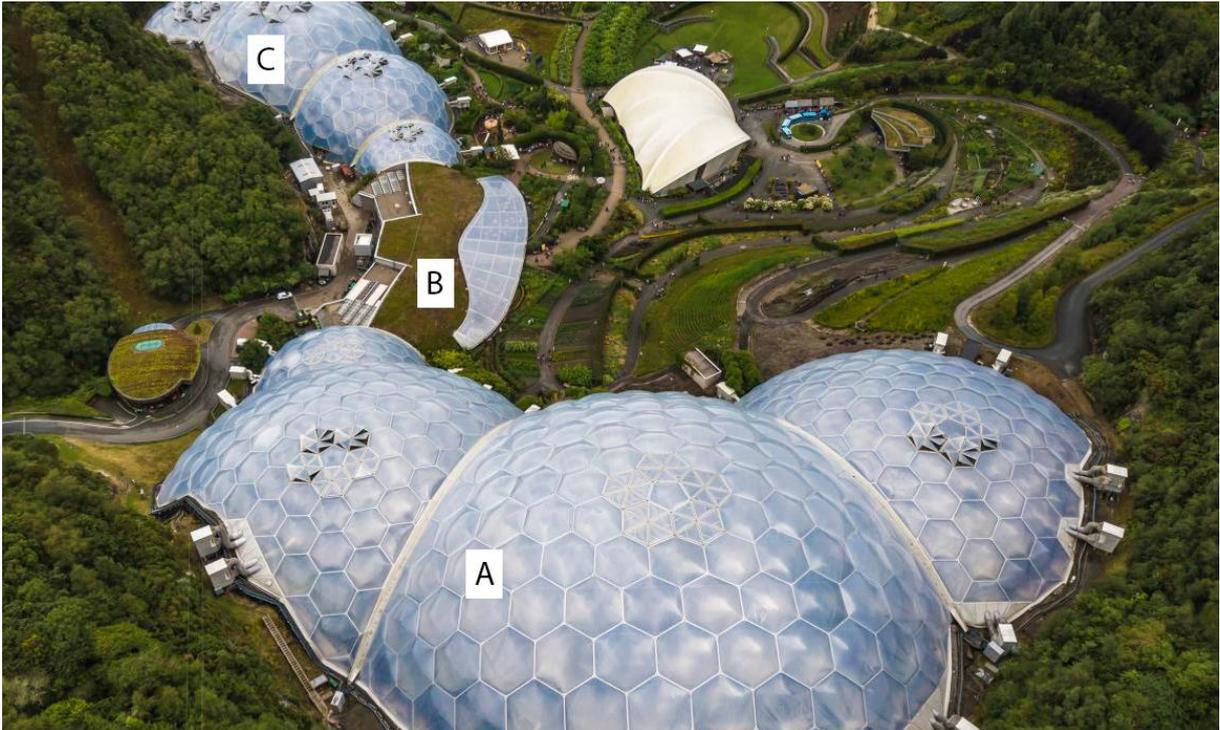


Figura 5.2 Projeto Éden, vista aérea das estufas. A; Estufa de biomas tropicais úmidos. B: edifício de ligação. C: Estufa de biomas mediterrâneos.
 Fonte: Modificado a partir de Eden (c2022).

O programa é concebido a partir de uma ideia de Tim Smit, que almejava uma enorme estrutura para abrigar uma vasta diversidade de plantas e atrair atenção para sua mensagem sobre a biodiversidade (LARSEN; TYAS, 2016). Apesar das intenções grandiosas, os autores comentam que o proprietário não contava com investimento, projeto e, em um primeiro momento, nem mesmo a definição de um terreno para o programa. Com isso, os arquitetos e engenheiros responsáveis precisavam gerar uma proposta de projeto rápida, econômica e adaptável à variação dos desníveis do solo (já que o terreno ainda não tinha sido adquirido), mas que ao mesmo tempo pudesse atrair a atenção de investidores.

Segundo Eden (c2022), a referência à bolha de sabão configura-se como uma solução para o problema do terreno, pois elas se acomodam a qualquer superfície, enquanto arquitetonicamente a inspiração está no sistema de geodésicas do arquiteto americano Buckminster Fuller, responsável pelo projeto da Biosfera de Montreal, obra investigada no capítulo anterior. Isso porque sua geometria é baseada na redução do peso da estrutura ao mesmo tempo em que maximiza a superfície dos domos. Então, a equipe de projeto do Éden se apropria da eficiência da Biosfera e avança para uma solução alternativa com uma forma mais orgânica, a partir da combinação de diversos domos interligados (LARSEN; TYAS, 2016).

Apesar de o projeto contar com grandes estruturas de vão livre que buscam a estabilidade a partir de uma arquitetura sustentável e atraente (GRIMSHAW, 2022), a definição do terreno em uma mina de barro ainda ativa e rodeada por penhascos em ruínas (Figura 5.3) trouxe complexidade para as soluções estruturais do projeto.



Figura 5.3 Terreno do Projeto Éden antes da construção.
Fonte: Eden (c2022)

Porém os responsáveis definem os domos geodésicos como alternativa para uma solução mais adaptável às superfícies irregulares do solo (Figura 5.4) sem a necessidade de alterar o tipo de estrutura do projeto (LARSEN; TYAS, 2016). Isto porque os domos podem ser criados com seções diferentes para se adaptarem às cotas do terreno. Além disso, uma vez que as geodésicas são construídas a partir da repetição de elementos, fabricar novas peças não exigiria um aumento significativo no custo da obra - como ocorre quando há necessidade de modificações na forma em projetos com outro tipo de estrutura. Dessa maneira, a linha de fundação (encontro da estrutura com o solo) seria definida apenas durante o desenvolvimento da construção, podendo ser adaptada às diferenças de nível do terreno.

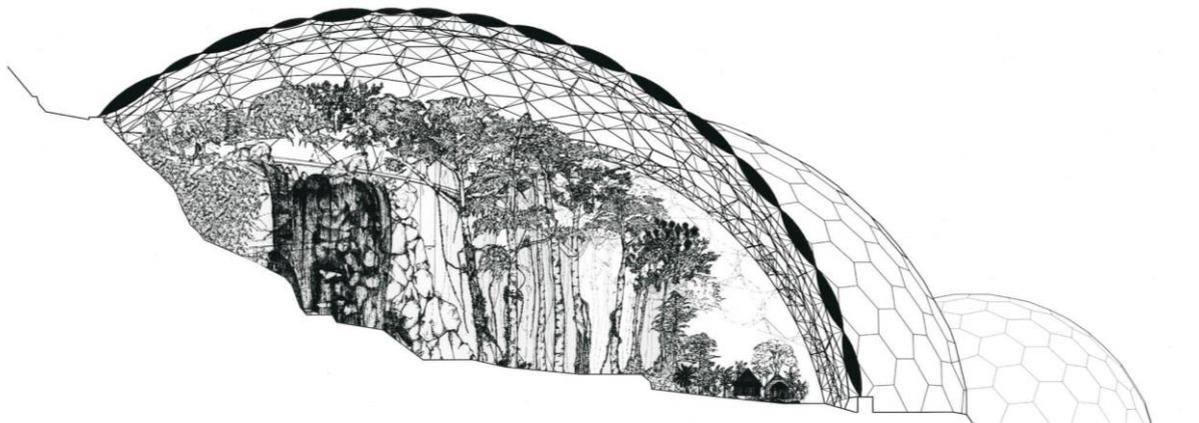


Figura 5.4 Esquema de uma seção nos domos destacando a adaptação ao terreno irregular.
Fonte: Grimshaw (2022).

Além da versatilidade formal da geodésica, ela assume um papel importante junto à solução estrutural do projeto, pela adição de uma segunda camada à estrutura principal dos domos. Nesse caso, a estrutura consiste em duas camadas de malhas em formato esférico com raios diferentes e mesmo centro (KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, 2002). A intenção de abordar a dupla camada de malhas é a mesma presente na Biosfera de Montreal: aumentar a resistência da estrutura. Tal solução garante seu funcionamento como uma treliça, devido à sua resistência à flexão (LARSEN; TYAS, 2016).

Porém, enquanto no projeto de Fuller as camadas são compostas por polígonos duais (uma camada apresenta hexágonos e a outra triângulos), as duas malhas presentes no Projeto Éden não têm a mesma relação entre as camadas. Segundo Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002), o arranjo geométrico da malha presente no Projeto Éden apresenta propriedades oriundas das formações cristalinas de silicatos (Figura 5.5), como o menor caminho de transmissão de energia e o menor consumo material possível. Dessa maneira, a geometria das cúpulas do Éden torna-se economicamente viável e, ao mesmo tempo, visualmente atrativa.

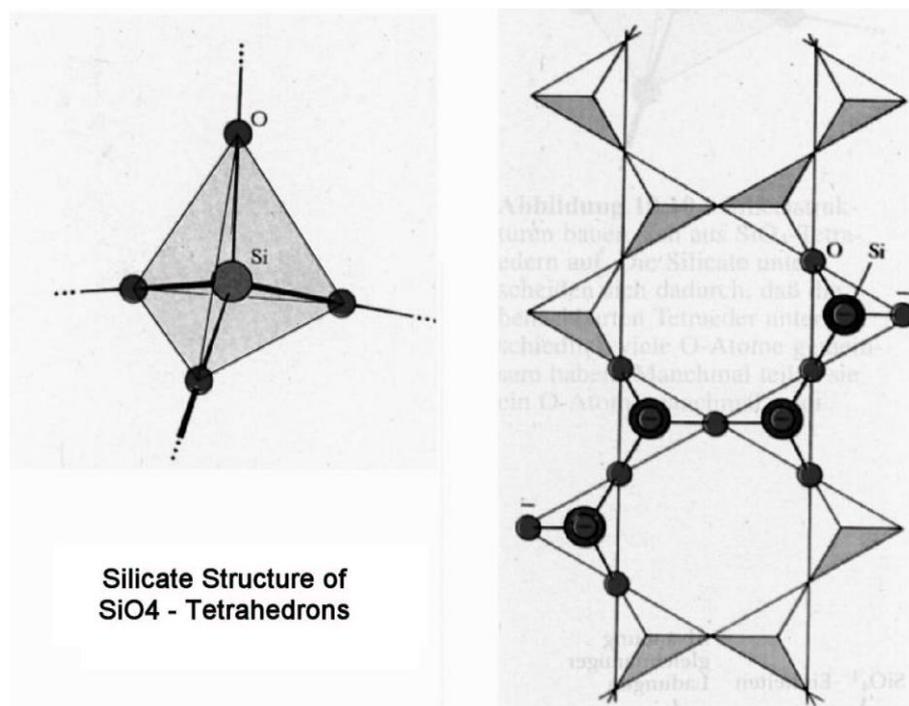


Figura 5.5 Formações cristalinas de silicatos (SiO₄).
Fonte: Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002).

O resultado está na Figura 5.6, em que é possível perceber a diferença entre as duas camadas, sendo a interna composta por elementos mais delgados.



Figura 5.6 Detalhe da estrutura visto de dentro da estufa.
Fonte: Vidler (c2022).

A camada externa é hexagonal conforme ilustrado em vermelho na Figura 5.7 A, da mesma maneira que a Biosfera, formando um padrão chamado de "*Hex-Net*" (KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, 2002). Porém a camada interna, que no projeto de Fuller era composta por triângulos, aqui apresenta hexágonos rotados em relação à camada externa, mas que possuem centro em comum, considerando-se uma projeção em um plano horizontal. Em uma análise bidimensional, em projeção paralela ortogonal sobre um plano horizontal, os hexágonos da camada interna (em azul na Figura 5.7) têm seus vértices posicionados na projeção dos pontos médios das arestas dos hexágonos que formam a camada externa (Figura 5.7 C). Em projeção horizontal ainda é possível observar que, ao se conectarem, ambos os vértices, da camada externa e interna, formam triângulos que possuem os centros posicionados nos vértices dos hexágonos da camada externa (em vermelho) (Figura 5.7 C). Por isso que a camada interna (azul) possui um padrão formado por uma composição de triângulos e hexágonos (Figura 5.7 B), sendo chamada de "*Tri-Hex-Net*" (KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, 2002).

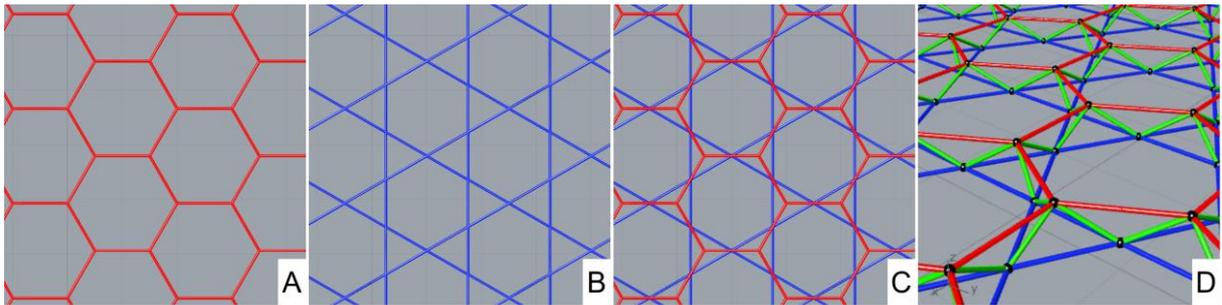


Figura 5.7 Padrões geométricos presentes nas malhas do Projeto Éden. A: composição de hexágonos, chamada de “Hex-Net”. B: composição de hexágonos e triângulos, chamada de “Tri-Hex-Net”. C: Sobreposição dos dois padrões. D: Perspectiva da dupla camada de malha como treliça.
Fonte: Elaboração própria.

Além disso, a dupla camada de malha é conectada a partir do que os autores chamam de diagonais, propiciando um comportamento de transmissão de carga tridimensional. Na Figura 5.7 D é apresentada uma modelagem esquemática das malhas projetadas em dois planos paralelos entre si, com suas conexões na cor verde, na qual não foi representada a curvatura da geodésica. Em vermelho o padrão hexagonal que compõe a camada externa da estrutura; em azul a camada interna com a composição de hexágonos e triângulos; e em verde é possível compreender a conexão entre as duas camadas através das diagonais.

Apesar de essa estratégia aumentar o número de conexões (nós destacados em preto na Figura 5.7 D), por conectar as duas camadas de malhas, uma de suas consequências é a diminuição do diâmetro dos tubos (de 500mm para 200mm) e redução o peso total da estrutura (aproximadamente 50%), provocando uma diminuição no valor total da construção devido ao baixo custo de fabricação das peças (LARSEN; TYAS, 2016).

Em relação a sua construção, os autores descrevem a apropriação ao sistema estrutural espacial MERO, que adota tubos aparafusados em nós, pois é mais econômico e permite configurações de geometrias mais complexas. Além disso, a estrutura de aço pesa apenas um pouco mais do que o ar contido nos próprios biomas, tornando a estrutura tão leve que é mais propensa a levantar voo do que desabar (EDEN, c2022).

Além desses tubos metálicos, a estrutura apresenta arcos no encontro entre cada um dos domos. Em um primeiro momento, esses elementos parecem assumir a função de apoio, conduzindo verticalmente as cargas da cobertura (para a fundação), porém Larsen e Tyas (2016) comentam que tais elementos não

transmitem as cargas nesse sentido, mas devolvem as forças horizontais para os próprios domos. Nesse sentido, os arcos são considerados elementos de transmissão de cargas horizontais, ou seja, foram modelados como vigas (KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, 2002).

Para Larsen e Tyas (2016), isso ocorre porque as geodésicas possuem tamanhos diferentes, conseqüentemente não conseguem se estabilizar uma com as outras. Além disso, suas posições e frequências também acabam variando, o que resulta em uma padronização desencontrada entre as geodésicas (LARSEN; TYAS, 2016). Embora os responsáveis tenham tentado rearranjar o padrão hexagonal para encaixar essas formas, a solução final se apoia na visão de que a geometria não precisa de um estado de solução perfeita (LARSEN; TYAS, 2016). Isso quer dizer que a geometria dos painéis não é contínua na transição entre as geodésicas, há uma interrupção do desenho na viga (arco), aplicando um corte no padrão hexagonal (visível externamente).

Para o sistema de fechamento da estufa, Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002) mencionam a substituição do vidro por um revestimento de ETFE (Etileno tetrafluoroetileno) preenchido com ar, como pode ser visto na Figura 5.8. Essa troca ocorre durante o processo de projeto, surgindo como uma alternativa mais viável para a construção e manutenção das estufas. Para os autores, isso acarreta na redução do peso do material e conseqüente diminuição da estrutura metálica, mas também possibilita uma maior entrada dos raios UV nas cúpulas e um bom isolamento térmico.



Figura 5.8 Fechamento dos domos com folhas de ETFE. À esquerda, detalhe do revestimento e à direita vista dos domos com destaque para o revestimento inflado.

Fonte: Eden (c2022).

Embora a leveza do material, que possui menos de 1% do peso do mesmo revestimento em vidro, o ETFE é um composto resistente o suficiente para aguentar o peso de um carro, além de permitir a passagem dos raios UV, ser antiaderente e autolimpante (EDEN, c2022). Outra diferença está na manutenção do revestimento (Figura 5.9), enquanto o vidro requer equipamento e maquinário para transportar e aplicar o material na cobertura da estufa, o rolo de ETFE - que cobriria uma área de 70m² - pode ser transportado e instalado manualmente (LARSEN; TYAS, 2016).



Figura 5.9 Manutenção do fechamento em ETFE.
Fonte: Eden (c2022).

São utilizadas, então, três camadas finas desse composto (Figura 5.10), garantindo um alto desempenho, eficiência e, por estar inflado, se apresenta como uma superfície máxima para um perímetro mínimo (GRAMSHAW, 2022). Assim, os hexágonos são compostos por duas almofadas em forma de lentes convexas (Figura 5.10), cujas faces planas estão voltadas uma para a outra e as partes curvas são posicionadas para fora e para dentro da estufa (LARSEN; TYAS, 2016).

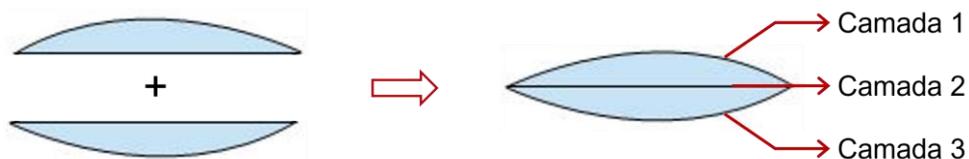


Figura 5.10 Definição das três camadas de ETFE.
Fonte: Modificado a partir de Richardson (2020).

Os painéis de ETFE, quando vistos de fora, parecem ser um material opaco, mas internamente eles são quase transparentes (LARSEN; TYAS, 2016). Combinando essa qualidade ótica com a dimensão das estufas e o nível do telhado muito acima do nível dos olhos, gera-se uma imersão capaz de fazer os usuários esquecerem que estão no interior de uma construção e acreditarem que estão efetivamente em uma floresta (LARSEN; TYAS, 2016).

Segundo Larsen e Tyas (2016), as folhas de ETFE têm algumas desvantagens. O ruído causado por impacto no material, como a chuva, pode agir como um tambor. Outro ponto negativo é a dependência de permanecer inflada para manter suas propriedades. E, devido a sua fina camada de ETFE, é possível que o material sofra danos acidentais (ou até mesmo maliciosos) e perca sua pressão interna. Para evitar isso, Larsen e Tyas (2016) explicam que existe um sistema que injeta ar constantemente em um determinado número de células (Figura 5.11), mas que possui gasto energético mínimo, uma vez que não é em fluxo contínuo, mas apenas mantendo a pressão interna constante.

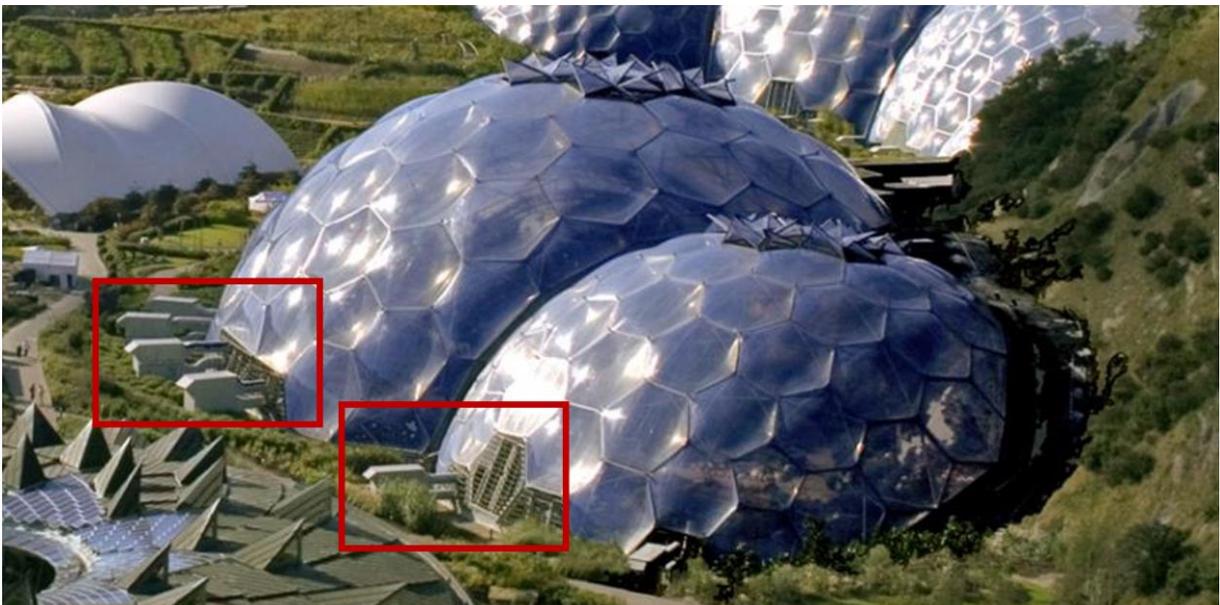


Figura 5.11 Vista das estufas do Projeto Éden. Destacado em vermelho o sistema de injeção de ar no revestimento dos domos.

Fonte: Modificado a partir de Eden (c2022).

Segundo Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002), todo esse conceito estrutural para o projeto atendeu aos requisitos necessários: redução do peso e quantidade de aço, revestimento transparente para entrada de luz solar, interior livre de apoios, forma atraente, estrutura econômica e de rápida construção.

5.1. Estrutura de saber do Projeto Édén

Aplica-se ao projeto Édén o mesmo tipo de explicitação do saber desenvolvida para a Biosfera. São identificadas similaridades (geodésica) e diferenças entre suas geometrias construtivas. Enquanto Fuller utiliza de uma única geodésica, o Projeto Édén apresenta uma composição desses elementos com frequências distintas. Também é possível identificar, conforme já relatado, a diferença nos padrões geométricos das malhas geodésicas dos dois projetos. O esquema da Figura 5.12 explicita os conceitos que caracterizam a obra em seus aspectos geométricos e arquitetônicos. No sentido vertical estão elencadas as transformações aplicadas na(s) geodésica(s) e a caracterização da dupla camada estrutural, em termos geométricos e construtivos. E no sentido horizontal as especificidades de cada conceito/etapa de geração, incluindo-se, na coluna à direita, descrições e justificativas de cada conceito e aplicações na arquitetura.

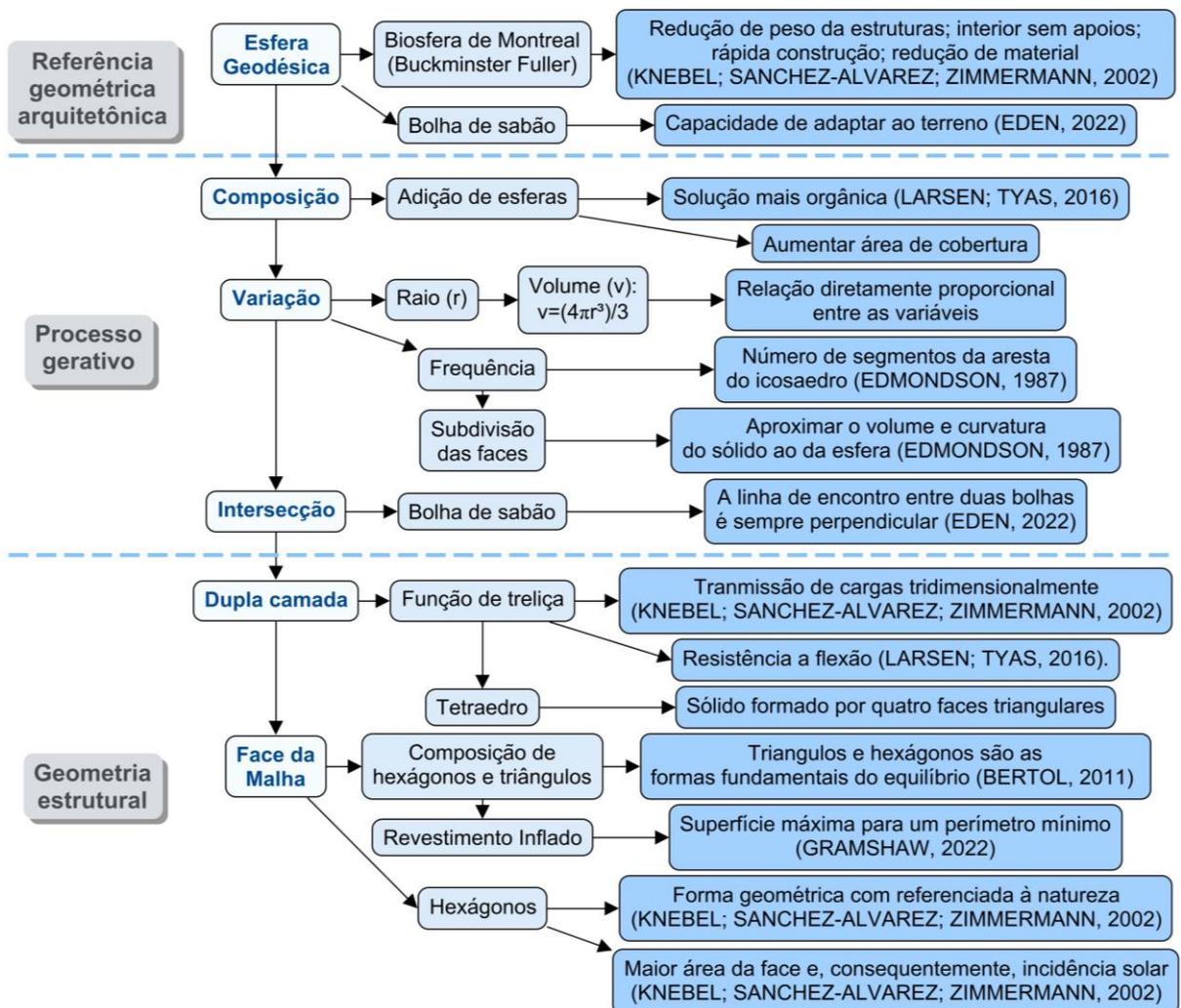


Figura 5.12 Esquema teórico do Projeto Édén.

Fonte: Elaboração própria.

Em relação à Biosfera, a estrutura de saber do Projeto Éden diferencia-se ao abordar uma composição de esferas geodésicas por adição de novos elementos. Além disso, propriedades como raio e frequência são diferentes para cada uma das esferas geodésicas da composição. Isso permitiu que o projeto se adequasse aos tipos de vegetações em seu interior, pois em determinados locais a estufa apresentaria volume adequado a viabilizar o plantio de vegetação de grande, médio e pequeno porte e ajustar a incidência de luz para aquele espaço.

Abordam-se, também, outras estruturas de saber para compreender o resultado do agrupamento entre as geodésicas. A referência é para as bolhas de sabão, devido ao seu comportamento tanto na conformação com outra bolha de sabão, como também no encontro com um plano. Quando duas bolhas de sabão se encostam, a linha formada entre elas (linha azul na Figura 5.13) é sempre perpendicular ao plano em que estão apoiadas (EDEN, c2022).

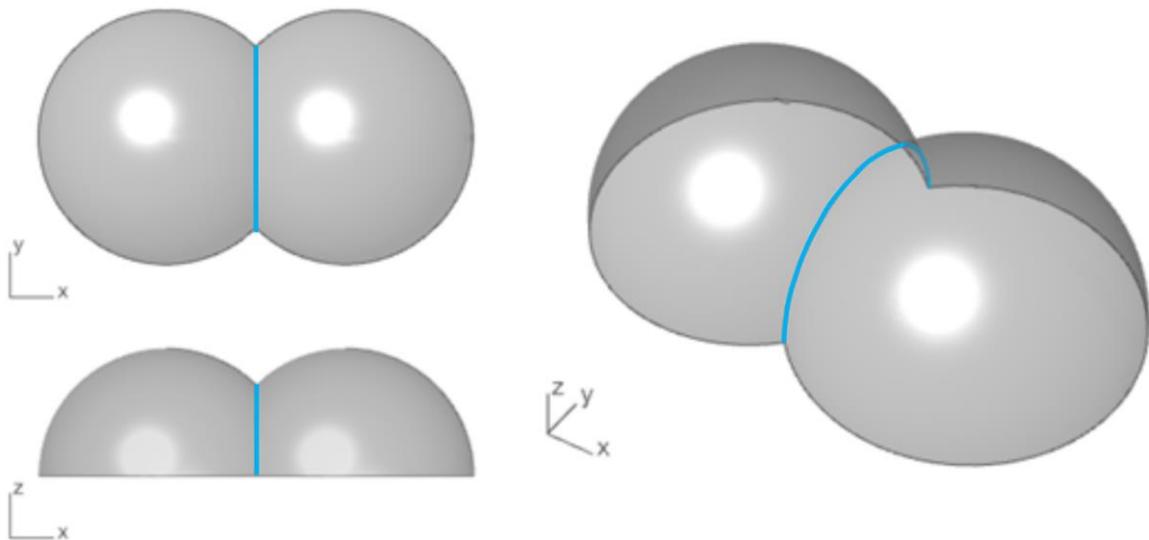


Figura 5.13 Modelagem representando o encontro entre bolhas de sabão.
Fonte: Elaboração própria.

Já em relação ao arranjo entre as bolhas, Joseph Plateau percebeu que em uma organização ideal o ângulo formado entre elas no plano bidimensional aproxima-se de 120° (linhas vermelhas na Figura 5.14). No espaço tridimensional, as curvas de interseção entre as bolhas (linhas amarelas na Figura 5.14) aproximam-se dos 109° presentes no tetraedro (BERTOL, 2011).

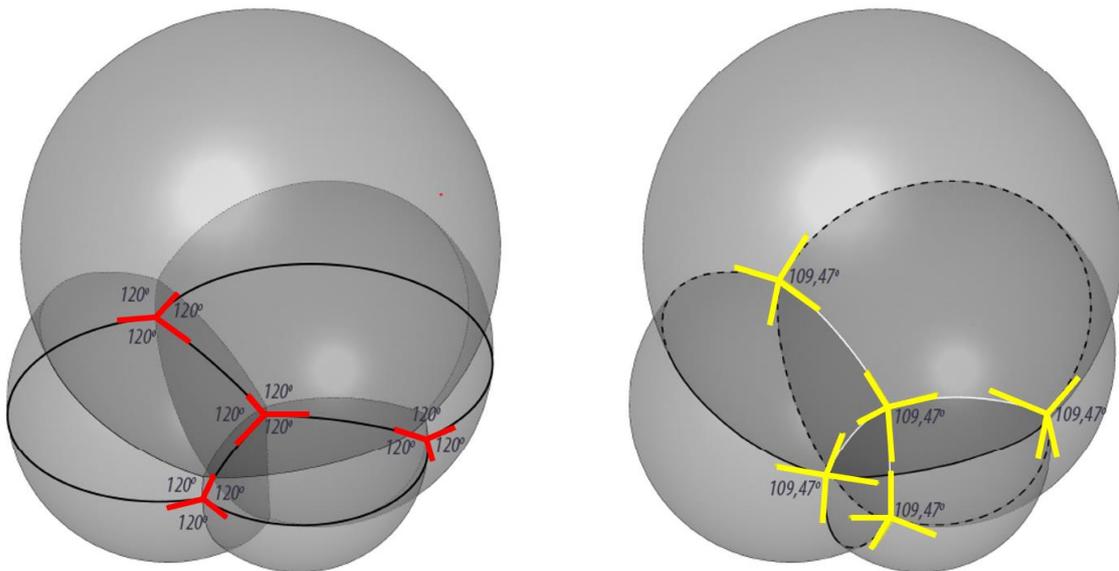


Figura 5.14 Representação da Lei de Plateau. Em vermelho a indicação do ângulo de 120° no plano bidimensional e em amarelo o ângulo de 109° tridimensionalmente.
Fonte: Jipa (2012).

A referência ao tetraedro retorna também com a aplicação estrutural da dupla camada de malha. Pois as arestas de conexão entre elas originam um tetraedro em cada vértice dos hexágonos da camada externa, como já analisado anteriormente. Com isso, a estrutura de saber do Projeto Éden se aproxima daquela identificada na Biosfera, ainda mais quando se considera que utilizou a geodésica de Fuller como seu ponto de partida. Porém, também é importante ressaltar que a estrutura de saber referente ao Éden possui uma maior complexidade geométrica decorrente do tipo de arranjo entre as geodésicas e da configuração das malhas da estrutura.

Assim como ocorreu no desenvolvimento da primeira obra, busca-se explicitar a estrutura do saber referente à representação digital da geometria da obra (técnicas e tecnologias de modelagem paramétrica) a partir da estrutura inicial identificada para o Projeto Éden. Com isso, delimitam-se algumas etapas necessárias para o planejamento de um processo de representação gráfica digital que se corresponda com a estrutura de saber anteriormente identificada (presente no discurso dos responsáveis pelo projeto). Na Figura 5.15 apresenta-se um esquema gráfico e descritivo em que são delimitadas as etapas de geração da forma do projeto Éden, de acordo com a estrutura de saber anteriormente explicitada.

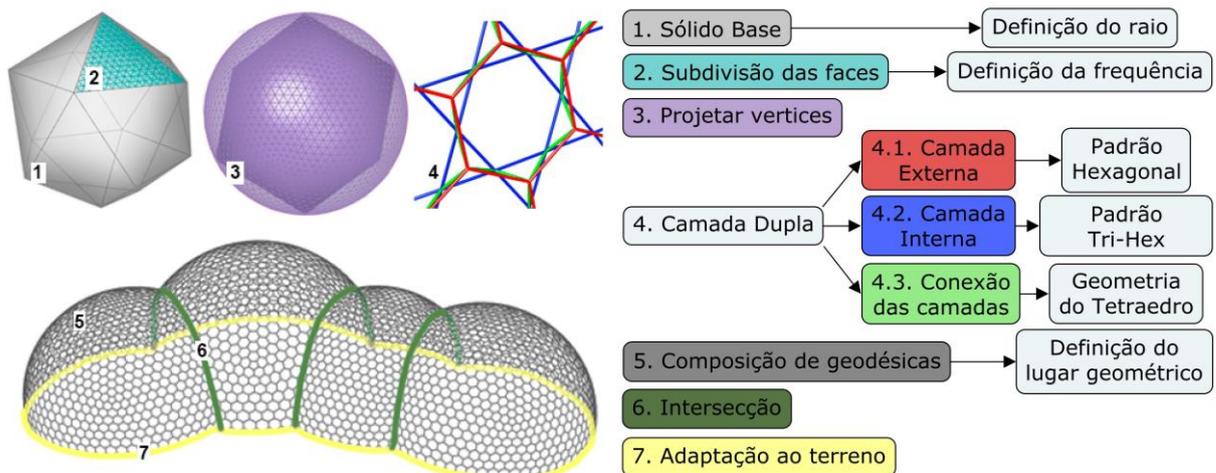


Figura 5.15 Esquema síntese do algoritmo e suas etapas para a geração da forma do projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria.

Conforme o esquema, a representação do Projeto Éden foi planejada para iniciar com a definição do sólido base de cada geodésica, o icosaedro, e os raios das esferas circunscritas (etapa 1). Na etapa 2, é feita a subdivisão das faces triangulares do sólido base (icosaedro), definindo a frequência de cada um dos domos, e a etapa 3 corresponde com a projeção dos vértices na circunferência. A etapa 4 corresponde com a representação da dupla camada de malha. Enquanto a etapa 5 corresponde ao processo de composição das geodésicas, caracterizado pela intersecção entre cada um desses elementos (etapa 6) e também com o terreno (etapa 7).

A estrutura de saber anteriormente explicitada pode ainda ser complementada com o discurso tecnológico, que alia cada técnica de representação por modelagem paramétrica empregada. Então, como resultado do esquema de modelagem da Figura 5.15, avançou-se para a definição de uma programação visual do modelo geométrico, apresentada na Figura 5.16. Esta será descrita e explicitada visualmente em cada uma de suas etapas de desenvolvimento no Apêndice A.

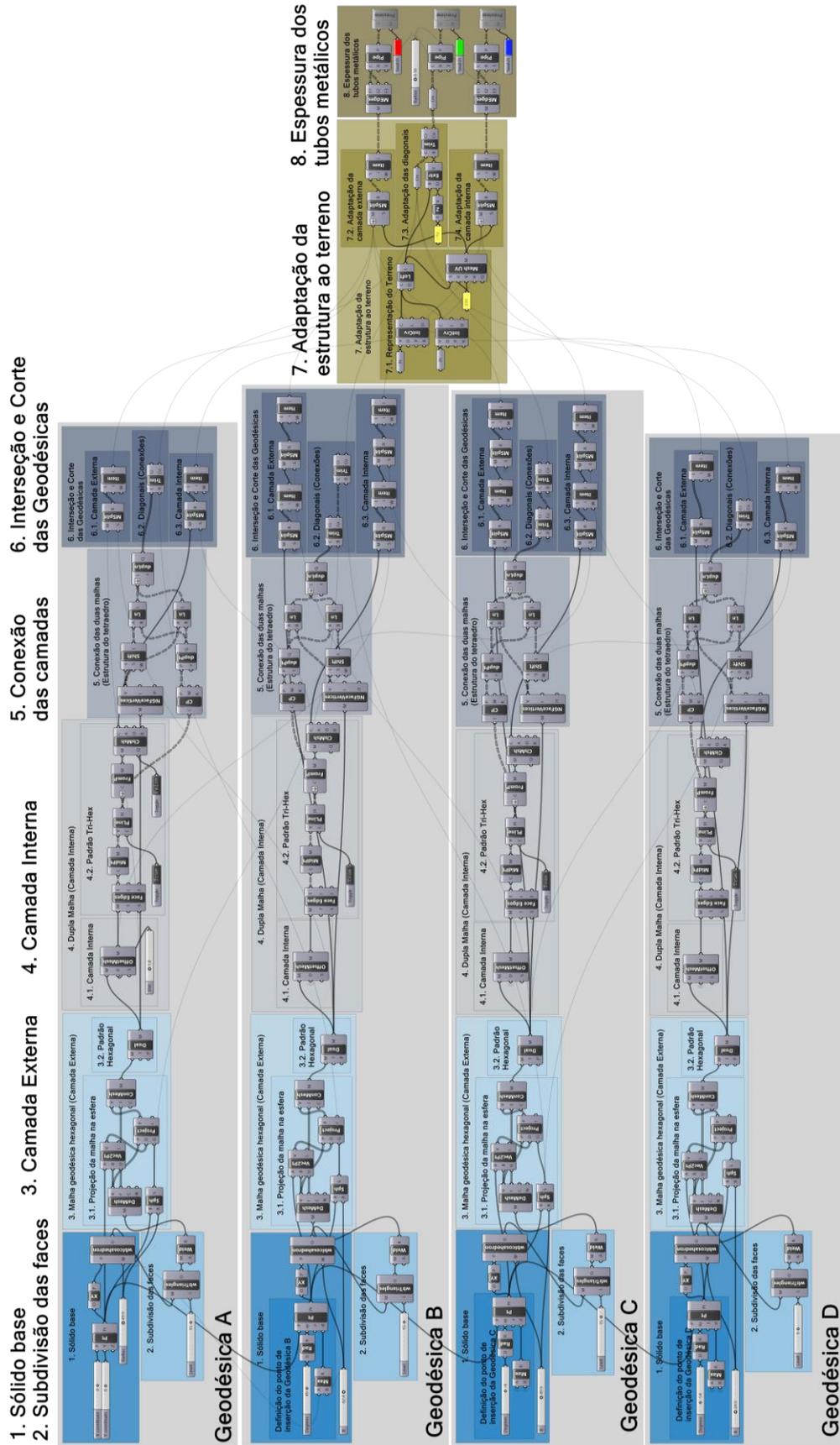


Figura 5.16 Programação visual do Projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria.

A obra, em sua totalidade, é um conjunto de estufas e, então, fez-se um recorte para abordar apenas a estufa maior, que abriga os Biomas de Trópico Úmido, composta por quatro geodésicas de raios e frequências diferentes. Na Figura 5.17 está destacado o conjunto de domos que compõem tal estufa, bem como a indicação dos parâmetros adotados em cada um deles, segundo Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002): (A) raio de 49,97 metros e frequência 15; (B) raio de 62,46 metros e frequência 15; (C) raio de 49,97 metros e frequência 15; e (D) raio de 24,98 metros e frequência 9.

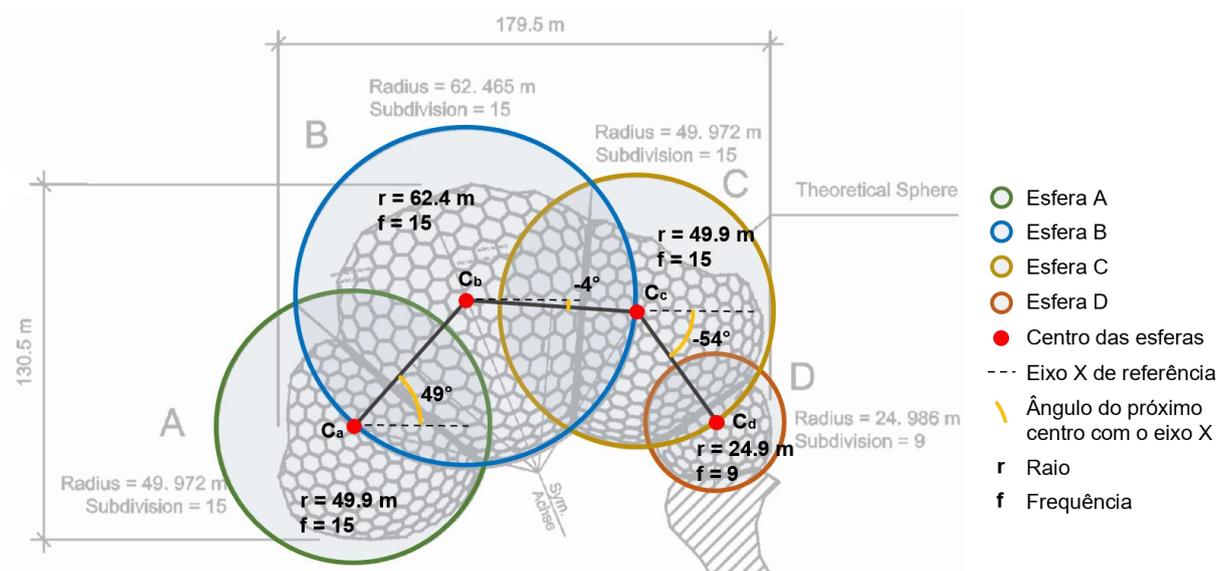


Figura 5.17 Análise geométrica da estufa de Biomas de Trópico Úmido.
Fonte: Modificado a partir de Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002)

Além de identificar parâmetros como raio e frequência, a análise da Figura 5.17 também permitiu identificar uma relação entre os centros das esferas para definir o posicionamento (lugar geométrico) das geodésicas quando observadas no plano XY (vista de topo). Entre duas esferas adjacentes a distância é equivalente ao maior raio entre elas. Consequentemente, o centro da esfera menor sempre estará sobre a circunferência da esfera maior.

Com isso, adota-se o sistema de coordenadas polar para definir a posição das geodésicas, isto porque cada ponto está rotado em relação aos centros das esferas anterior e posterior. Segundo Pottmann et al (2007), esse sistema configura uma distância radial de um ponto em relação a outro, adotando um ângulo polar entre eles. Ou seja, define um ponto (centro da geodésica a ser localizada) a partir de um ângulo (identificado na Figura 5.17) e uma distância (maior raio entre as duas geodésicas) em relação a um ponto de origem (centro da primeira geodésica).

Desse modo, é estabelecida a relação entre as geodésicas, sendo que estas sempre estarão conectadas e apresentarão um entrelaçamento entre elas, o que garante uma unidade à estufa.

Já a Figura 5.18 ilustra as diferenças entre as alturas (coordenada Z) dos domos. Esta variação ocorre exclusivamente em função da diferença dos raios das esferas, pois se observa que seus centros estão localizados na mesma altura, inseridos em um plano horizontal. Ou seja, quando definidas as quatro geodésicas, todos seus centros compartilham o mesmo valor para a coordenada Z. Dessa maneira, ao adotar o sistema de coordenadas polar para a inserção das geodésicas, este estará definindo apenas os valores cartesianos de X e Y.

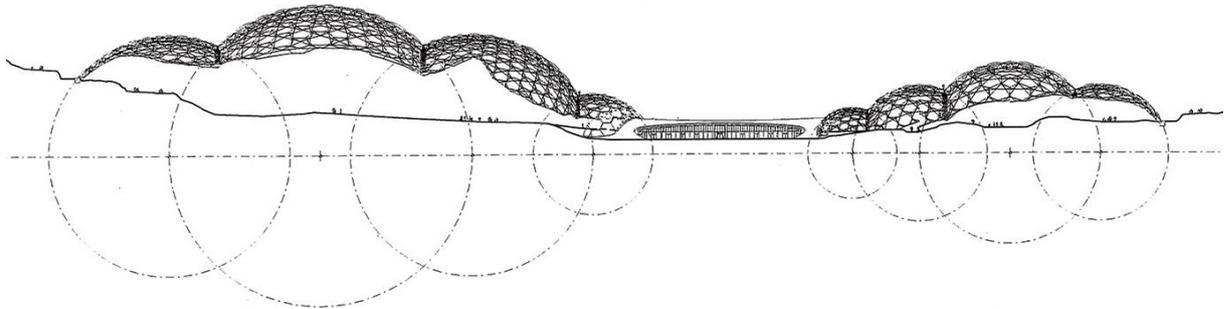


Figura 5.18 Corte esquemático do prédio com um esquema das circunferências interseccionadas.
Fonte: Grimshaw (2022).

Na Figura 5.19 são apresentadas as imagens da representação digital resultante da programação visual para as etapas 1, 2 e 3 da modelagem. O projeto tem início com a definição de um ponto (A) como centro para a construção do sólido base, o icosaedro (B), definindo assim a primeira etapa. Na etapa 2, as faces do sólido são subdivididas em triângulos menores (C e D). Então, na etapa 3, constrói-se a circunferência do icosaedro (E) e projetam-se nessa circunferência os vértices da subdivisão (F) e assim obtém-se uma malha geodésica (G) que, na etapa 4, terá suas faces transformadas em hexágonos (H).

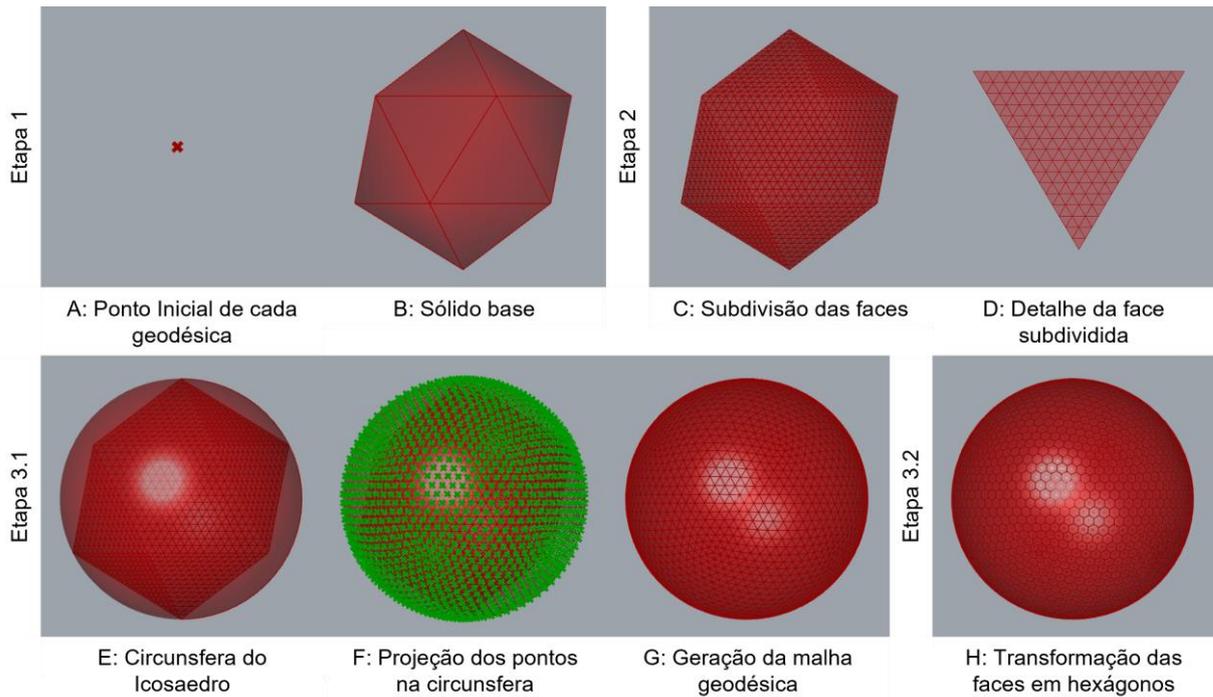


Figura 5.19 Representação gráfica das etapas 1, 2 e 3 do modelo do Projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria.

Destaca-se que em um primeiro momento, planejou-se realizar a modelagem a partir de uma única geodésica, como um elemento fundamental do projeto, obtendo-se instâncias desta por translação e variando-se cada um dos raios por meio de transformações de escala. No entanto, esta solução não permitiu a construção de um modelo parametrizável que se correspondesse com todas as superfícies adotadas no projeto. Isso porque inviabilizou obter como produto uma composição de elementos com variação de frequência. Consequentemente, a programação desenvolvida inclui a modelagem de quatro geodésicas distintas.

Como esse processo ocorre em mais de uma geodésica também é necessário ilustrar o processo para as quatro geodésicas ao mesmo tempo. Na Figura 5.20 está representada a simplificação dessas primeiras etapas para o conjunto de geodésicas. Assim, destaca-se a localização dos pontos no espaço (A), a modelagem do icosaedro em cada um deles (B), as circunferas de cada elemento (C) e a malha hexagonal de cada domo (D).

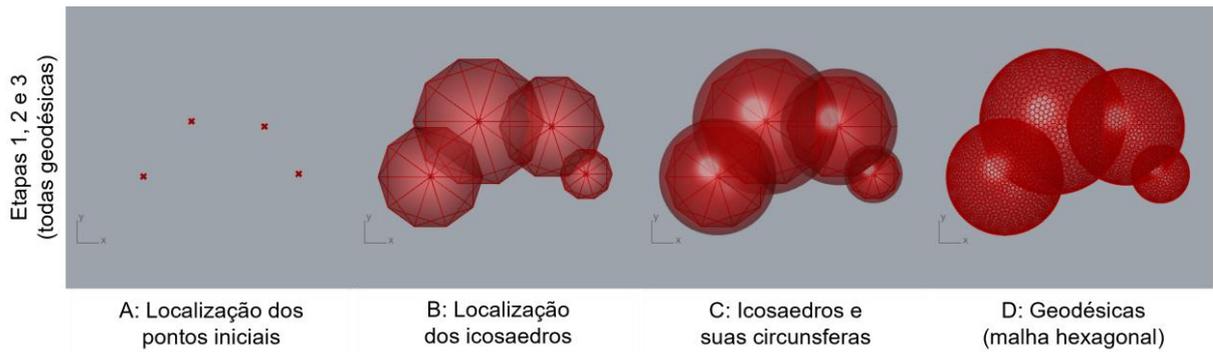


Figura 5.20 Representação gráfica das etapas 1, 2 e 3 do modelo do Projeto Éden para todas geodésicas.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 5.21, estão apresentadas as imagens das etapas 4, 5, 6, 7 e 8. Na etapa 4, a partir das geodésicas são projetadas as malhas equidistantes para representar a camada externa, denominadas malhas offset (A), tendo ainda o padrão *hex-net* (B). Para a construção do padrão *tri-hex-net* são selecionados os pontos médios das arestas (C) e estes são conectados (D). Depois, na etapa 5, ocorre a seleção dos pontos da malha interna (E) e da malha externa (F), para a modelagem da conexão entre eles (G). Na etapa 6 (H, I e J) as geodésicas são interseccionadas umas com as outras, para que se possa remover as partes que se sobrepõem. A modelagem do terreno a partir de pontos (K) e a intersecção das geodésicas com esse terreno (L) configuram a etapa 7. E na etapa 8 estão agrupadas as representações das espessuras das arestas de cada malha, bem como a aplicação de cor para diferenciar cada uma das camadas (M).

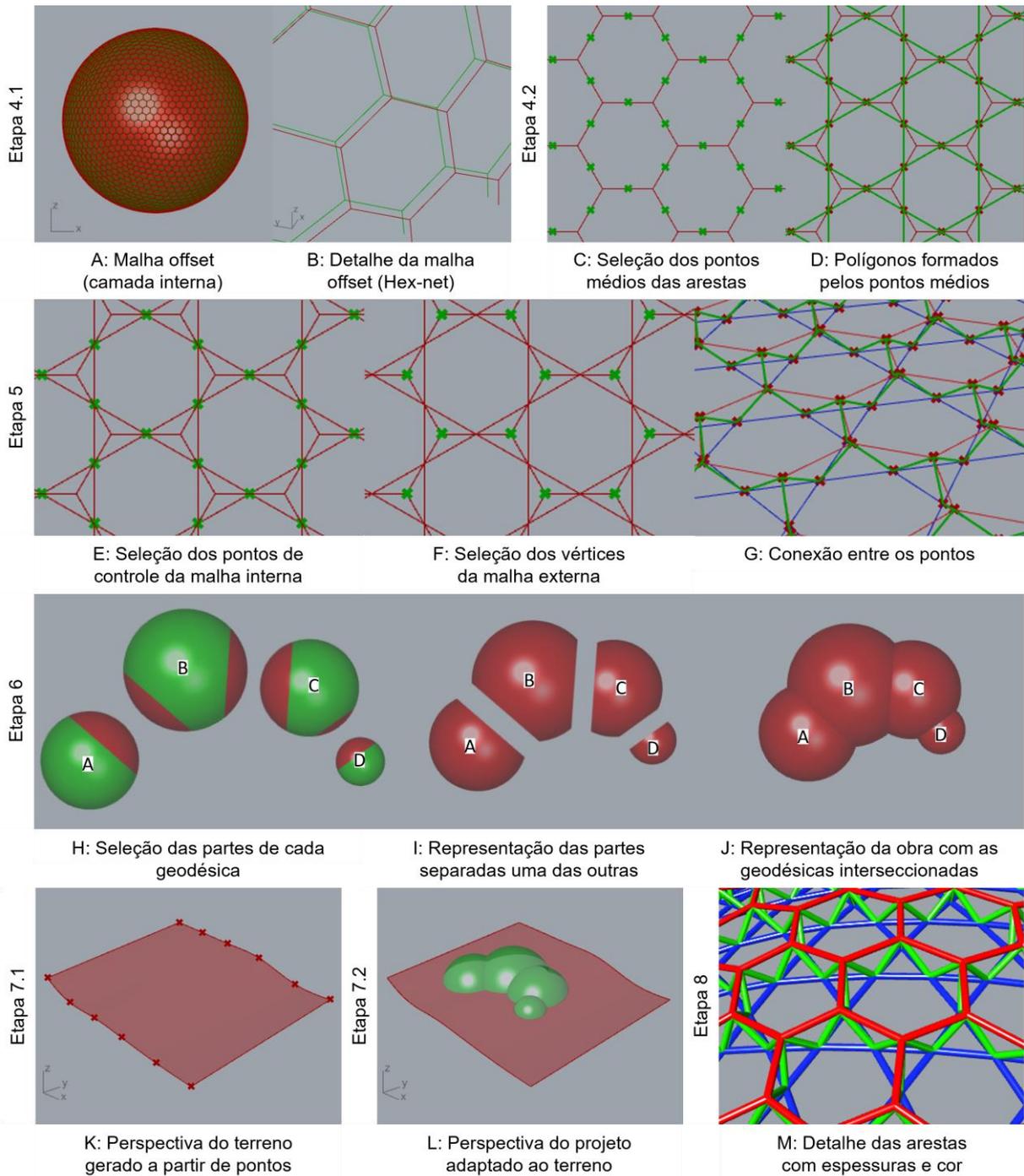


Figura 5.21 Representação gráfica das etapas 4, 5, 6, 7 e 8 do modelo do Projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria.

Ao final desse processo de modelagem do Projeto Éden, o resultado pode ser observado na Figura 5.22. Em azul estão os elementos que compõem a camada interna, em vermelho a camada externa e em verde os elementos de conexão.

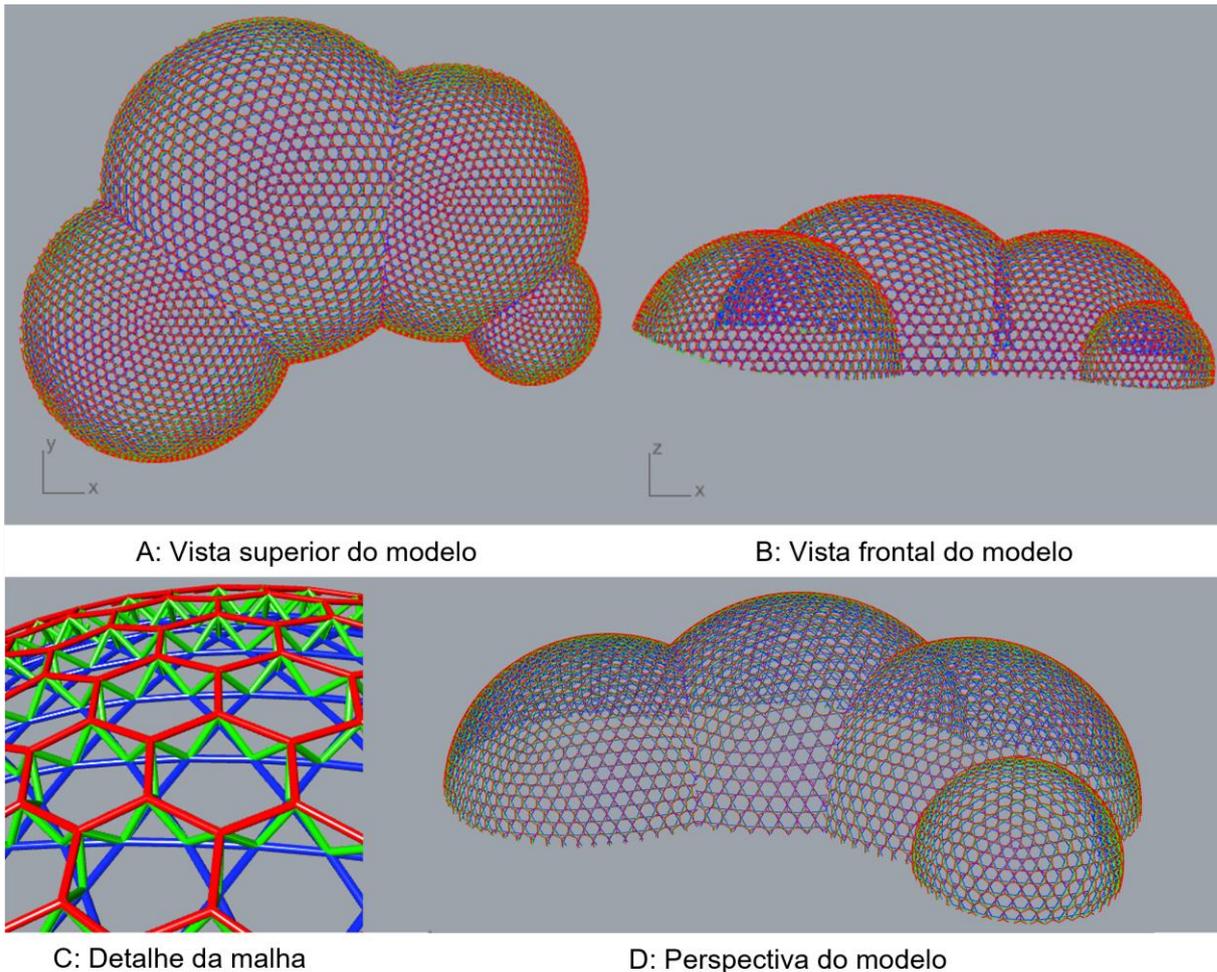


Figura 5.22 Vistas superior, frontal, detalhe e perspectiva do modelo final do Projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria.

Há uma distinção importante entre os procedimentos aqui escolhidos e aqueles adotados na Biosfera e que, conseqüentemente, ampliam a estrutura de saber tratada. No caso da Biosfera, a modelagem da dupla camada tem origem em duas geodésicas distintas, com raios maior e menor. Porém, na modelagem do Projeto Éden, como existe a repetição das geodésicas, realizar esse processo para a representação da camada interna de quatro geodésicas com raios menores resultaria em uma programação visual extensa e repetitiva.

Enquanto na Biosfera realiza-se uma etapa para projetar novamente os pontos do icosaedro em uma segunda esfera menor, no Projeto Éden se otimiza a programação ao gerar uma segunda malha, equidistante à primeira já modelada. Isto porque, segundo Pottmann et al (2007), tanto o processo de projetar os pontos do icosaedro em uma esfera menor quanto o processo de representar uma malha equidistante, usam como referência a direção dos vetores normais da superfície, que

neste caso, convergem para o centro da esfera (Figura 5.23). E isso ocorre com a projeção interna e com a externa.

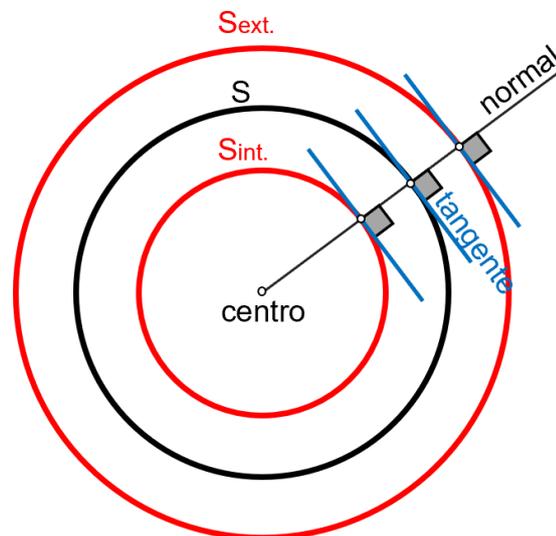


Figura 5.23 Representação de circunferências concêntricas e equidistantes (interna e externa), com as tangentes e normais por um ponto destas.

Fonte: Elaboração própria, baseada em Pottmann et al (2007).

As malhas offset, segundo Pottmann et al (2007), são aquelas que possuem correspondência de um para um em número de vértices, arestas e faces e com uma distância constante de uma em relação à outra (traçada na direção dos vetores normais). Avança-se assim para o conceito de malha offset na qual cada ponto da nova malha é obtido pelo deslocamento de cada vértice em uma distância d na direção de sua normal.

A Figura 5.24 ilustra esse processo em uma porção de uma malha geodésica. Para cada vértice (Figura 5.24 A), é definida a normal (Figura 5.24 B). Porém, como é uma malha esférica, quando prolongadas, as normais se encontram no ponto que representa o centro da geodésica (Figura 5.24 C). Na Figura 5.24 D os novos pontos são definidos a uma distância d dos pontos originais. Então a malha offset é reconstruída com esses novos pontos (Figura 5.24 E). Dessa maneira é possível definir a dupla camada de malha, sendo a camada interna uma equidistância da camada externa, e vice-versa.

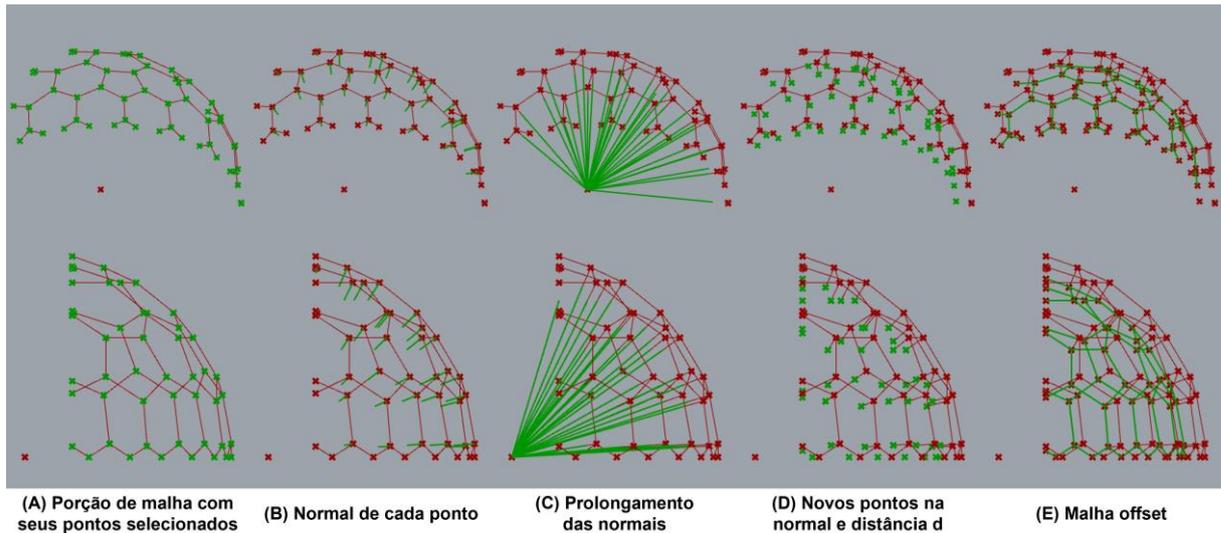


Figura 5.24 Processo de obtenção da malha offset.

Fonte: Elaboração própria.

Outro elemento a se considerar na estrutura do Projeto Éden é que a presença de três camadas, a externa (*Hex-Net*), a interna (*Tri-Hex-Net*) e a de conexão entre elas, aliada ao fato de que a distância entre elas é pequena em relação aos seus diâmetros, gera uma sobreposição de volume entre elas (Figura 5.25 A). As partes que ultrapassam os limites das malhas adjacentes são subtraídas da composição, como representado na Figura 5.25.

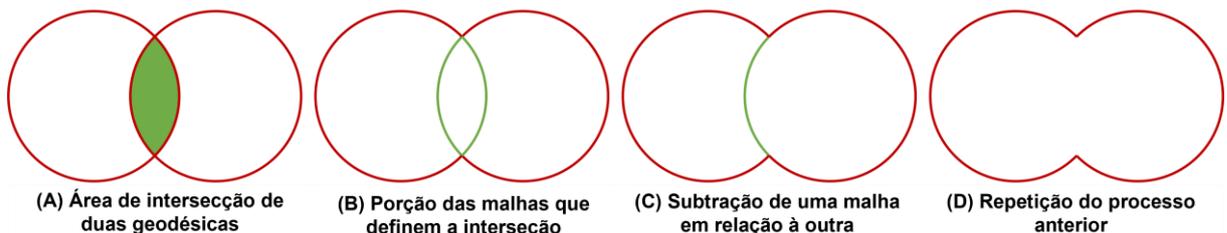


Figura 5.25 Processo de subtração da porção interseccionada.

Fonte: Elaboração própria.

5.2. Revisão das classificações quanto ao tipo de face e função da malha na Biosfera de Montreal

Em relação às classificações das malhas iniciadas na etapa de revisão de literatura, busca-se ampliar sua compreensão após o desenvolvimento do estudo específico do Projeto Éden. O primeiro tópico a ser analisado é o tipo de geometria das faces da malha (Tabela 5.1). Durante a revisão de literatura, foi identificada uma repetição de hexágonos no envoltório das estufas, caracterizando a geometria das faces da malha como regular (destacado em cinza na tabela). Naquele momento, apesar de se ter conhecimento de uma segunda camada de malha na geometria do projeto, esta não era visível nas imagens encontradas da obra, devido ao

revestimento externo que esconde esta geometria. Após aprofundar o estudo do projeto, foi possível reconhecer que essa camada combina polígonos hexagonais e triangulares. Além disso, identificou-se a importância da dupla camada de malha na estrutura do Projeto Éden. Portanto, passa-se a classificar a malha da camada externa como regular (hexágonos) e a malha da camada interna como semirregular (hexágonos e triângulos).

Tabela 5.1 Classificação do Projeto Éden quanto à geometria das faces da malha

Geometria das Faces no Projeto Eden			
		Inicial	Pós Est. do Saber
Regular	Triângulo		
	Retângulo		
	Hexágono		Camada Externa
Semi Regular			Camada Interna
Irregular	Diag. de Voronoi		
	Triang. de Delauney		

Fonte: Elaboração própria.

Depois, busca-se repetir esse processo de análise para a revisão dos tipos de aplicações ou funções das malhas no projeto. A partir do estudo e explicitação da estrutura de saber, identificou-se mais de uma aplicação para as malhas e confirmaram-se aquelas identificadas inicialmente, como descrito na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Função da malha no Projeto Éden

Função das Malhas no Projeto Eden		
	Inicial	Pós Est. do Saber
Representação Digital		
Computacional		
Tesselação		
Otimização da Forma		
Otimização Estrutural		
Geração da Forma		

Fonte: Elaboração própria.

A primeira aplicação a ser analisada é a representação digital. É importante destacar que Fuller, ao desenvolver sua geodésica, abordou cálculos e representações analógicas. Já o Projeto Éden, mesmo que referenciando a Biosfera, sua representação digital foi aplicada frente aos recursos tecnológicos disponíveis, os quais viabilizaram a definição da geometria paramétrica e a conclusão do projeto

no prazo previamente estipulado. Nesse sentido, confirma-se a função de representação identificada na etapa inicial da pesquisa.

Depois, avança-se para as novas aplicações da malha para esse projeto. O segundo uso identificado no Projeto Éden é a tesselação, sendo mais relacionada com os processos de geração da geodésica. Para Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002), essa aplicação está presente na etapa de subdivisão das faces do icosaedro. Segundo os autores, esse processo transforma o sólido em uma malha. Então, apesar de não existir uma etapa específica de transformação de uma superfície em malha durante o desenvolvimento do Projeto Éden, sua classificação quanto a tesselação está integrada na origem de sua geometria, já que esta se apoia nas geodésicas de Fuller para a configuração da forma.

Outra etapa identificada somente após o aprofundamento no estudo do Projeto Éden é a otimização da forma. Essa função ocorre quando existe uma padronização dos elementos da malha, a qual viabiliza a construção do projeto, tornando-o mais flexível frente às constantes mudanças topográficas do terreno. Ou seja, os nós e arestas poderiam ser fabricados em excesso, para atender as adaptações do projeto ao local, consolidando a proposta geométrica entre os responsáveis e também entre os investidores.

Por fim, a malha também integra a solução estrutural do projeto. Se os elementos estruturais responsáveis da primeira proposta de projeto eram arcos assimétricos, a transmissão de cargas passou a ser repensada quando a malha foi considerada uma alternativa projetual. Adotar a malha, mais especificamente a dupla camada de malha, permitiu otimizar a estrutura das geodésicas e promover dois benefícios muito significativos ao projeto. O primeiro, reduzir a dimensão das peças (arestas) e, conseqüentemente, também reduzir o peso próprio da estrutura. O segundo, garantir uma maior estabilidade para a estrutura dos domos.

5.3. Análise e discussão de resultados

O presente capítulo é, ao mesmo tempo, a apresentação de um novo projeto arquitetônico e a continuação do saber estruturado no capítulo anterior. Se, por um lado, é a modelagem que representa as tomadas de decisões diferentes, que buscam atender um programa de necessidades, existem neste projeto soluções que

se relacionam com a demanda, terreno, material e mão de obra disponível, até mesmo com o contexto em que se inserem.

Por outro lado, se apresenta como seguimento do projeto anterior ao replicar algumas de suas ambições e propriedades, como a sustentabilidade, referência no meio ambiente, seu caráter expositor (da sinérgica na Biosfera e de conceitos de preservação do meio ambiente no Projeto Éden). Mas também por ambos se apropriarem de uma geometria que traduz concretamente para a obra tais propriedades, como uma maneira de reforçar (e alcançar) os ideais pretendidos com o projeto.

A base dos modelos geométricos de ambas as obras é estruturada a partir de conceitos em comum, como a geodésica e a dupla camada de malhas. Os projetos estão relacionados de maneira a permitir o aproveitamento da própria programação da Biosfera, ou até mesmo em relação a estrutura de saber explicitada, oferecendo avanços ao ensino de geometria e parametria, assim como sua abordagem (aplicação) na prática profissional.

Em relação ao ensino, os conceitos envolvidos nos processos de projeto e paramétrico apresentados, não só estão explicitados, como também são apresentados em diferentes níveis de especificação. Isso quer dizer que existe um aumento gradual no nível de complexidade entre os dois projetos e que pode ser explicitado a partir da estrutura de saber teórica, técnica e tecnológica que os envolve.

Capítulo 6

Estudo do Water Cube

6. A descrição do Water Cube

Considerado um dos projetos mais inspiradores dos últimos anos, devido a sua grande dimensão e forma não convencional, o Centro Aquático Nacional de Pequim é primeiro e o único exemplo de estrutura baseada na espuma (bolhas) em grande escala (SENSES, 2007). O prédio (Figura 6.1) é resultado de um avançado projeto estrutural, cuja equipe de projeto alia engenharia e arquitetura para uma abordagem formal que, segundo Senses (2007), consolida sua importância e o torna uma referência para futuras construções. Seu uso relacionado com esportes aquáticos e a forma linear do prédio lhe garantem o nome de Water Cube.



Figura 6.1 Fachada do Water Cube iluminada para Dia Olímpico Internacional de 2022.
Fonte: Xiaoshan (2022).

Com o início do projeto datado em 2003 e sua execução finalizada em outubro de 2007, a edificação é um centro aquático localizado na cidade de Pequim, na China, construído para atender os jogos olímpicos de 2008. O crescimento da cidade na época já era evidente, o que preocupava o governo com questões como a infraestrutura e sustentabilidade local (POHL, 2008). Devido a isso, os concursos que definiram os projetos para os prédios olímpicos possuíam a intenção de abordar propostas com soluções inovadoras para atender a capital chinesa (ECCLES; EDMONDSON; KARADZHOVA, 2010). Consequentemente, o projeto do Water Cube possui uma preocupação com eficiência energética, bem como o interesse na

conservação da edificação, visto que a sustentabilidade é uma das características marcantes no desenvolvimento de projetos no escritório Arup (ECCLES; EDMONDSON; KARADZHOVA, 2010).

O corpo técnico do concurso avaliou as propostas que melhor atenderam a dois principais critérios: os requisitos do uso esportivo e, depois, questões culturais da proposta e como ela se adequava ao entorno (POHL, 2008). Apesar de os três projetos finalistas terem sido escolhidos pelo corpo técnico do concurso, a decisão final para o ganhador foi definida por meio do voto popular (ECCLES; EDMONDSON; KARADZHOVA, 2010). Isto demonstra que, além das qualidades estruturais e arquitetônicas, a proposta também possui apelo popular, agradando não só a comissão julgadora especializada como também a população local.

No interior das paredes de bolha existem piscinas para natação, mergulho, nado sincronizado e polo aquático (POHL, 2008), além de incluir máquina para produzir ondas e outros equipamentos para a manutenção das piscinas, como também restaurante e espaço para arquibancadas que atendem até 17000 espectadores (ARUP, 2022). Porém o projeto não se limitava ao uso olímpico, depois do evento deveria ser adaptado para deixar um legado como um centro aquático de referência (ZOU; LESLIE-CARTER, 2010). Ou seja, depois do período das olimpíadas o prédio deveria se adaptar para um centro aquático multifuncional, recreativo, esportivo e de musculação depois dos jogos (POHL, 2008).

Zou e Leslie-Carter (2010) comentam que, para isso, o projeto deveria atender três critérios principais: qualidade da construção, definindo as olimpíadas como jogos sustentáveis, tecnológicos e populares; ter um custo de até 100 milhões de dólares para sua construção e de até 10 milhões para reformas posteriores aos eventos olímpicos, visando reduzir a área de espectadores e incluir novos usos para a edificação; e, por fim, o gerenciamento do tempo de execução do projeto, para garantir o perfeito funcionamento do prédio até sua inauguração oficial.

Liderados por Arup Project Management, a equipe responsável pelo projeto do Water Cube é resultado de um consórcio entre as empresas australianas Arup e PTW Architects, com a empresa chinesa China Construction Design International (CCDI). A equipe contou com mais de 100 engenheiros, arquitetos e especialistas, divididos em 20 disciplinas e espalhados por quatro países (ZOU; LESLIE-CARTER,

2010). Dessa forma, combinava a cultura local chinesa com o sucesso da parceria entre os escritórios australianos, que em 1993 foi responsável pelo projeto do Centro Aquático Internacional de Sidney (ECCLES; EDMONDSON; KARADZHOVA, 2010).

Porém, anteriormente à submissão do projeto ao concurso, a parceria não chegava a um consenso sobre o conceito, sendo apenas com a revelação do projeto de outro estádio olímpico que a decisão foi tomada (ECCLES; EDMONDSON; KARADZHOVA, 2010). Então, além da referência às bolhas, o Water Cube possui seu conceito atrelado ao contraste dos dois estádios, evidenciando o "yin-yang", importante conceito na cultura chinesa (ZOU; LESLIE-CARTER, 2010). Segundo o relato do engenheiro da Arup encontrado em Eccles, Edmondson e Karadzhoza (2010), a cor vermelha e as curvas do estádio nacional (Bird's Nest, Figura 6.2 B) foram determinantes para definir o quadrado azul como conceito para o Water Cube (Figura 6.2 A), pois os dois prédios representam os opostos que se completam: o quadrado e o círculo, o azul e o vermelho, a água e o fogo (Figura 6.2).



Figura 6.2 Dualidade dos projetos Water Cube (A) e Bird's Nest (B) em Pequim em fotografia noturna. Fonte: Klook (c2022).

Segundo Pohl (2008), um dos arquitetos de referência para o projeto do Water Cube é Toyo Ito, conhecido por criar prédios extremamente conceituais, que misturam os mundos físico e virtual. Nesse sentido, a forma do Water Cube faz referência ao próprio uso da edificação, um centro aquático, e para isso se apropria do conceito de preencher a edificação com água, combinando forma e função através das bolhas de sabão (ZOU; LESLIE-CARTER, 2010).

Chris Bosse, um dos arquitetos do grupo responsável pelo design do Water Cube, cita Frei Otto e Buckminster Fuller como duas das suas principais influências, por explorarem uma relação entre natureza e arquitetura, desencadeando estruturas

baseadas em formas naturais (POHL, 2008). Então, enquanto o uso de formas poliédricas para representar as bolhas aproxima o conceito do Water Cube com os domos facetados de Fuller, o conceito de minimizar a área de superfície aponta uma proximidade com a arquitetura de Otto, cujas tendas surgem da observação das películas de sabão (POHL, 2008).

Limitar tais bolhas a um envoltório retangular (Figura 6.3) está associado com a cultura local, que segundo Zou e Leslie-Carter (2010), relaciona formas quadradas (Water Cube) com a terra e formas circulares (Bird's Nest) com o paraíso. Plateau também relacionou cada um de seus sólidos com um elemento, atribuindo o cubo ao elemento terra devido à sua estabilidade (CROMWELL, 1997). Além disso, o quadrado, na cultura chinesa, é utilizado como geometria primária para as cidades, palácios e casas (POHL, 2008). Utilizar tal forma junto à planta do Water Cube aproxima a população, promovendo um pertencimento ao lugar a partir da identificação de figuras geométricas.



Figura 6.3 Vista aérea do Water Cube.
Fonte: Pohl (2008).

Adotar a estrutura baseada na bolha de sabão, segundo os engenheiros e arquitetos responsáveis pelo projeto, é uma alternativa repetitiva e edificável, ao mesmo tempo em que aparenta ser uma forma orgânica e aleatória (ARUP, 2022).

Essa percepção de complexidade, segundo Araújo e Celani (2016), é de interesse dos projetistas, mas que buscam ao mesmo tempo uma solução relativamente simples de entender, calcular e construir. Nesse sentido, o Water Cube é um projeto que aparenta complexidade em sua geometria, mas que está relacionado com uma estrutura e lógica simples - a bolha de sabão e sua repetição.

Isso permite que o projeto tenha uma solução que diverge da abordagem estrutural tradicional (SENSES, 2007). Nos métodos tradicionais, o projeto estrutural não é desenvolvido em conjunto com o arquitetônico, existe uma separação entre tais soluções, que acabam limitando o próprio projeto arquitetônico. Em contrapartida, o Water Cube apresenta uma estrutura que é integrante do projeto arquitetônico, funcionando da mesma maneira que as estruturas da natureza, cujo objeto é a própria estrutura (SENSES, 2007). Para a autora, a estrutura é um elemento único (não há divisão dos elementos em colunas, vigas e lajes), fazendo com que o sentido das forças esteja relacionado apenas com a posição de cada elemento metálico na estrutura. Aqueles situados na cobertura transmitem a carga horizontalmente, enquanto que os elementos da parede transmitem verticalmente.

Sua estrutura passa por um processo de otimização em diversas etapas do desenvolvimento do projeto. A primeira busca promover uma estrutura mais robusta para as paredes do que para a cobertura, reforçando a estrutura das paredes e reduzindo os níveis de tensão de seus elementos quando comparados com a cobertura (SENSES, 2007). Já o segundo processo de otimização está relacionado com a seção das barras metálicas, pois busca reduzir o peso da estrutura a partir da diminuição dessas seções (SENSES, 2007). E, por fim, uma otimização geométrica que busca diminuir as tensões de flexão dos membros das paredes e do telhado em função da intensa atividade sísmica local (SENSES, 2007). Então, apesar de parecer frágil, Arup (2022) afirma que a estrutura é extremamente resistente, sendo capaz de suportar as condições sísmicas de Pequim, considerando até mesmo o Water Cube como a estrutura mais resistente à terremotos (sismos) no mundo.

Sua estrutura é composta por 22 mil barras metálicas e 12 mil nós de conexão (ZOU; LESLIE-CARTER, 2010). Segundo Senses (2007), o módulo adotado na repetição é o conjunto de bolhas baseado no modelo físico-matemático mais eficiente de divisão do espaço em células de volumes iguais, o Weaire-Phelan.

Historicamente, a busca por definir a forma das bolhas é datada em um problema matemático desde o final do século XVIII, formulado por Lagrange em 1760, que buscava encontrar a menor área de superfície para um determinado contorno (CARMO, 1987). Tal problema foi abordado mais tarde, no século XIX (entre 1843 e 1869), por Plateau, para um arranjo de bolhas de sabão. A estrutura resultante da espuma é relacionada com a energia superficial das bolhas de sabão, que assumem formas para minimizar sua área (WEAIRE; ASTE, 2008). E, assim como os demais sistemas da natureza que se organizam em um arranjo (como as células), os autores acreditam que a similaridade com os poliedros esteja relacionada com sua capacidade geométrica de preencher o espaço.

Joseph Plateau é considerado o pioneiro na pesquisa sobre espuma, tendo definido o comportamento do agrupamento de bolhas de sabão (SENSES, 2007). A partir das suas observações, em 1873, foi capaz de estabelecer três leis de comportamento das bolhas (POHL, 2008). As duas primeiras, já abordadas no capítulo do Projeto Éden, definem que os ângulos de encontro entre as bolhas são de 120° para a película de sabão (a própria bolha) e $109,47^\circ$ (ângulo do tetraedro) nos encontros dos vértices. Weaire e Aste (2008) comentam que esses ângulos identificados nas estruturas das bolhas de sabão são uma consequência da minimização energética da estrutura. E, por fim, a terceira lei estabelece que as bolhas de sabão são sempre curvas devido à diferença de pressão entre cada uma das bolhas (WEAIRE; ASTE, 2008). Nesse sentido, as arestas das células que representam as bolhas de sabão também devem se apresentar levemente curvadas.

Apesar de as leis de Plateau serem aplicadas a qualquer espuma em equilíbrio, elas não definem a estrutura geométrica que melhor representa as bolhas (WEAIRE; ASTE, 2008). Isso ocorre porque o físico baseava seu método na observação e deixava a comprovação e justificativa das suas teorias para outros pesquisadores.

É somente com Lord Kelvin (Sir William Thomson), em 1887, que existe um modelo geométrico tridimensional das bolhas de sabão (Figura 6.4). Sua proposta é tão fiel às leis geométricas das bolhas de sabão que Weaire e Phelan (1994) consideram o desenvolvimento deste modelo como um desenho das observações de Plateau. Segundo Weaire e Aste (2008), este modelo poderia ser descrito como uma forma modificada do octaedro truncado, mas que Kelvin o chamava de

“tetrakaidecahedron”. Embora o termo seja atribuído à célula de Kelvin, ele é considerado uma variação da escrita de “tetradecaedron” (tetradecaedro) que apresenta o mesmo significado. Segundo Weisstein (c2022a), são os sólidos que apresentam 14 faces, independente das geometrias das suas faces.

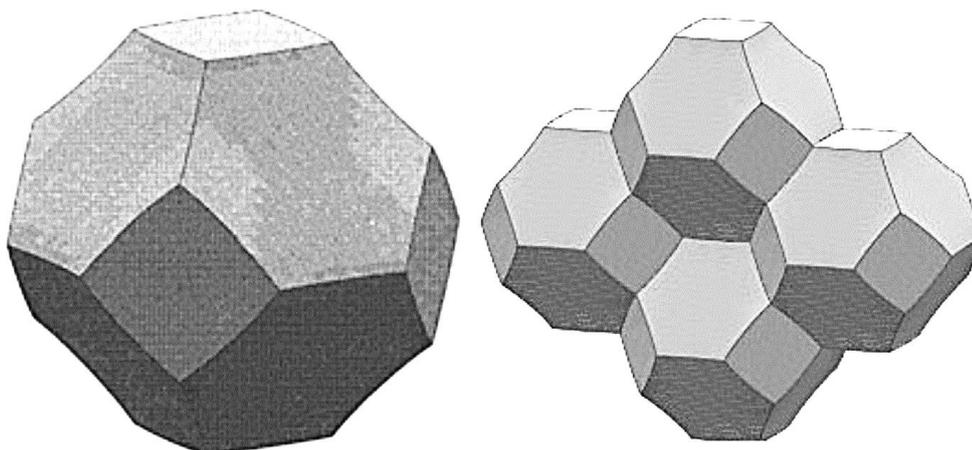


Figura 6.4 Tetradecaedro de Kelvin e seu modelo de agrupamento da bolha de sabão.
Fonte: Senses (2007).

Para Weaire e Aste (2008), não há dúvidas de que a célula proposta por Kelvin seja a solução correta se as bolhas fossem restritas a uma única forma e orientação constante. Segundo os autores, o questionamento sobre a geometria de Kelvin passa a ocorrer quando percebem que, na natureza, as bolhas têm mais liberdade do que o proposto no modelo. Então, Weaire e Phelan (1994) avançam em pesquisar novos modelos, indo além de uma solução geométrica, mas que também aumente a eficiência da superfície, a partir da proporção entre área e volume.

A ideia original surge da tentativa de encontrar uma referência na natureza que se assemelhe à forma desenvolvida por Kelvin (WEAIRE; ASTE, 2008). Com isso, Weaire e Phelan buscam compreender os componentes químicos chamados de clatratos, estruturas cristalinas formadas pelo conjunto de um elemento e que assume uma função de gaiola, envolvendo um átomo ou molécula específica. Então, os pesquisadores exploraram tal geometria e inseriram o modelo mais simples - que mescla células de 12 e 14 faces em um conjunto - no software de modelagem de líquidos disponível na época (*Evolver*). Esse primeiro experimento foi imediatamente superior ao modelo proposto por Kelvin, apresentando 0.3% menos área (WEAIRE; ASTE, 2008). O modelo em questão surge a partir da estrutura periódica $\text{Na}_8\text{Si}_{46}$ (WEAIRE; PHELAN, 1994) e pode ser visto na Figura 6.5. Essa

estrutura é formada a partir dos átomos de silício (Si), em azul, que envolvem os átomos de sódio (Na), em verde e laranja.

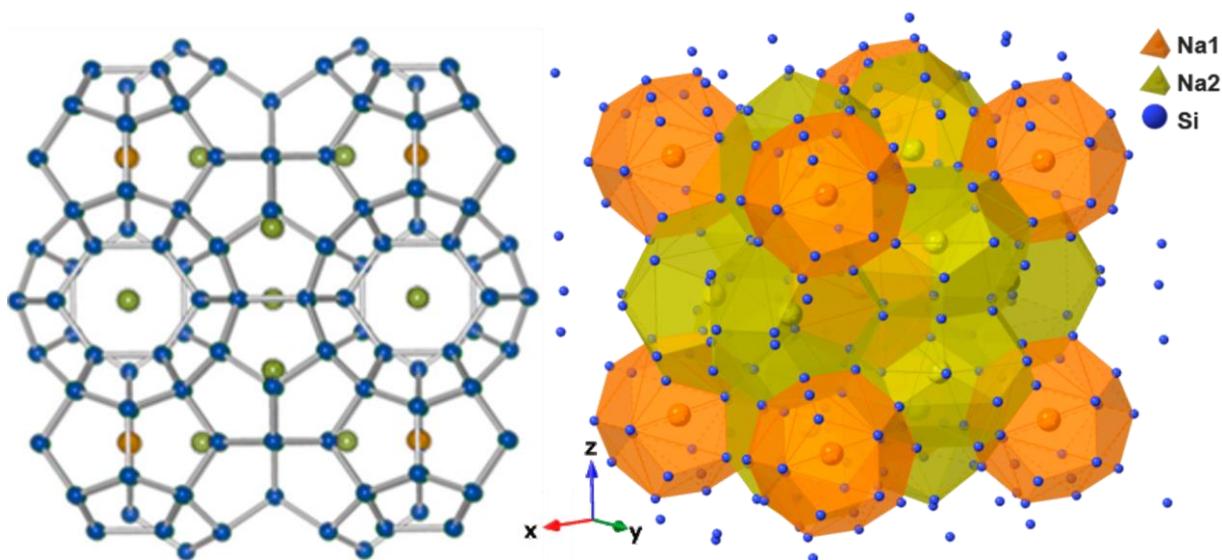


Figura 6.5 Clatrato $\text{Na}_8\text{Si}_{46}$ em vista superior (esquerda) e perspectiva (direita).
Fonte: Modificado a partir de Blosser e Nolas (2013) e Pickledsquid (2002).

Nessa estrutura, os átomos de silício se conectam por meio de ligações tetraédricas (Figura 6.6) e envolvem, como gaiolas, os átomos de sódio (WEAIRE; PHELAN, 1994). Ou seja, os átomos de silício que integram essa estrutura periódica possuem ligações com outros quatro átomos de silício.

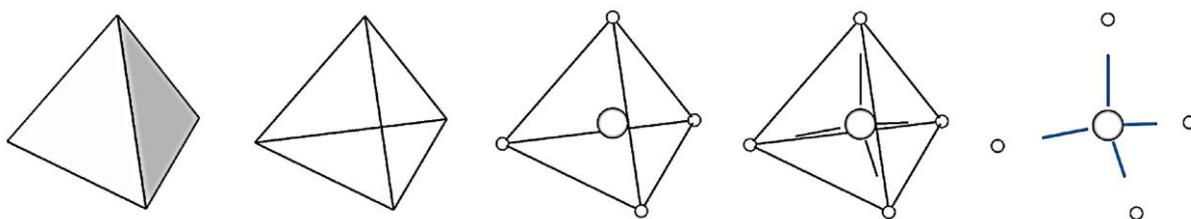


Figura 6.6 Estrutura geométrica das ligações tetraédricas.
Fonte: Elaboração própria.

A estrutura mínima do composto apresenta duas geometrias diferentes (Figura 6.7) que, embora variem as formas e os números de faces, possuem volumes idênticos (POHL, 2008). Conseqüentemente, Weaire e Phelan combinam esses dois tipos diferentes de células para configurar seu modelo de espuma.

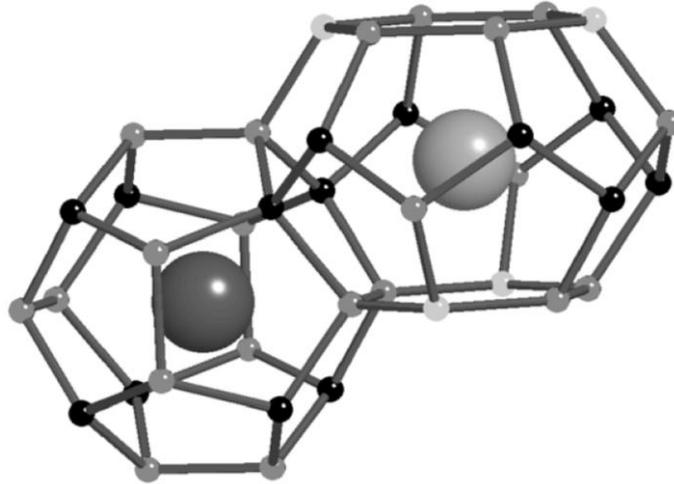


Figura 6.7 Estrutura mínima do composto $\text{Na}_8\text{Si}_{46}$, formada por dois clatratos (poliedros).
Fonte: Perottoni e da Jornada (2001).

Na Figura 6.8 estão representados as bolhas e o módulo que determina a espuma (agrupamento de bolhas). O primeiro é um dodecaedro pentagonal irregular, um poliedro de 12 faces, composto por faces pentagonais não planas (Figura 6.8 A). Enquanto o segundo é um tipo de tetrakaidecaedro, poliedro formado por 14 faces, sendo duas hexagonais (e planas) e doze faces pentagonais não planas (Figura 6.8 B). O módulo da espuma, ou seja, o conjunto de poliedros em que é aplicada a repetição para formar a espuma, é o agrupamento formado por 8 bolhas (Figura 6.8 C), sendo dois dodecaedros e seis tetradecaedros (WEAIRE; PHELAN, 1994).

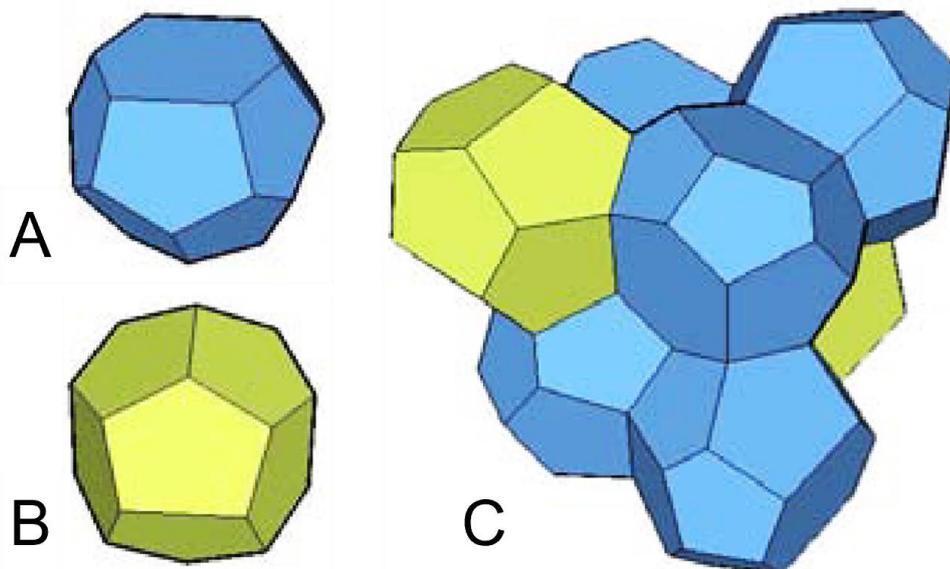


Figura 6.8 A: poliedro de 14 faces. B: poliedro de 12 faces. C: Módulo do modelo de Weaire-Phelan.
Fonte: Senses (2007).

As arestas presentes nos modelos geométricos de bolhas de sabão de Weaire-Phelan são levemente curvadas, devido à diferença de pressão no interior e

exterior da célula e, dessa forma, os pesquisadores encontram uma maior eficiência na razão da área e volume das unidades. Porém, Senses (2007) considera essa curvatura insignificante para o estudo e inconveniente para aplicação em estruturas espaciais. Então, sua baixa curvatura faz com que sejam imperceptíveis ou apenas desconsideradas nos modelos tridimensionais.

Esta mesma autora busca compreender a estrutura por trás da aparência complicada e aparentemente aleatória do Water Cube. Tendo como base o processo ilustrado pelo próprio escritório responsável pelo projeto (Figura 6.9), a autora busca compreender a transição do modelo de espuma (teórico) para uma estrutura arquitetônica de grande escala. O processo ocorre inicialmente a partir da definição das células de bolha de sabão (o conjunto de bolhas de Weaire-Phelan) e a combinação de centenas dessas estruturas.

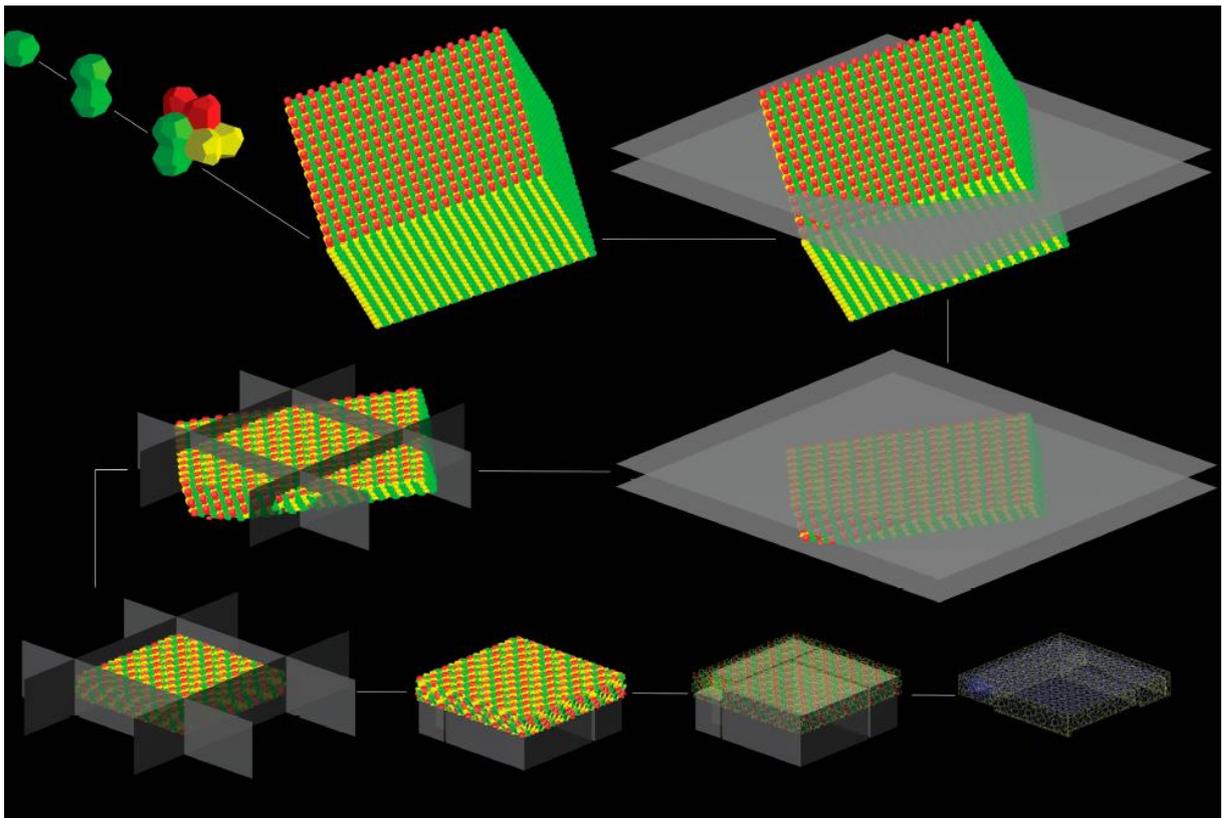


Figura 6.9 Processo de criação da geometria do Water Cube.
Fonte: Arup+CSCEC+PTW (POHL, 2008).

Como não se encontrou na literatura explicitamente a quantidade de vezes que o modelo de WP é repetido, identificou-se esta quantidade a partir da imagem disponibilizada pelo escritório do projeto. Observa-se a presença de 19 unidades do modelo em cada direção, aproximando a forma de um cubo de 19x19x19.

Segundo Pohl (2008), o modelo de espuma de Weaire-Phelan, apesar da completa regularidade na repetição dos elementos, o seu conjunto pode ser percebido como aleatório e orgânico quando visto de um ângulo arbitrário. Devido a esta propriedade, no projeto do Water Cube esse grande agrupamento de bolhas é rotado em duas direções, o que faz o modelo perder o alinhamento com os eixos de referência e acrescenta a percepção de aleatoriedade à forma. Por fim, a geometria é cortada a partir de um prisma de base quadrada de 177x177x31m, restringindo as bolhas a uma figura com referência à cultura local.

Embora essas transformações nas bolhas resultem em uma aparência aleatória, segundo Senses (2007), é possível perceber a repetição da geometria quando se observa detalhadamente a fachada, tentando compreender os elementos que integram o padrão externo da edificação.

O revestimento das fachadas do Water Cube é feito de etileno tetrafluoroetileno (ETFE), que foi inicialmente escolhido como alternativa ao vidro devido à sua menor reflexão sonora (ECCLES; EDMONDSON; KARADZHOVA, 2010). No entanto, suas vantagens vão muito além das questões acústicas, pois esse material pesa apenas 1% do peso do vidro e é um isolante térmico mais eficiente (ARUP, 2022). Além disso, o ETFE é translúcido, o que permite a entrada de luz solar e reduz o consumo de energia elétrica. Também é um material autolimpante, já que a chuva que incide sobre o revestimento é capaz de limpá-lo (ARUP, 2022).

Segundo Tristram Carfrae, diretor e engenheiro estrutural da ARUP, o primeiro exemplo na arquitetura de uma edificação de grande porte a adotar o ETFE como revestimento foi o Projeto Éden, que não era apenas um fechamento, mas uma estufa (ECCLES; EDMONDSON; KARADZHOVA, 2010). Dessa maneira, pode-se dizer que o Water Cube se apropria da função de estufa promovida pelo revestimento como uma maneira de maximizar o uso das energias renováveis para o aquecimento e iluminação arquitetônica (ZOU; LESLIE-CARTER, 2010). Isso porque as duas camadas de ETFE das paredes permitem manter o ar entre elas, o que promove o isolamento térmico.

Além disso, devido à falta de recursos hídricos na capital chinesa, é proposto um aproveitamento de 80% da água das chuvas que incidem sobre a cobertura do

Water Cube, reduzindo o impacto local nos reservatórios municipais de água (ARUP, 2022). Outra estratégia adotada é o aproveitamento da energia solar no interior do prédio, em que cerca de 20% é absorvida para aquecimento das piscinas e áreas internas da edificação (ARUP, 2022).

6.1. Estrutura de saber do Water Cube

A partir dos conceitos presentes nos discursos analisados até então, configura-se uma estrutura (Figura 6.10) que caracteriza a obra em seus aspectos geométricos e arquitetônicos.

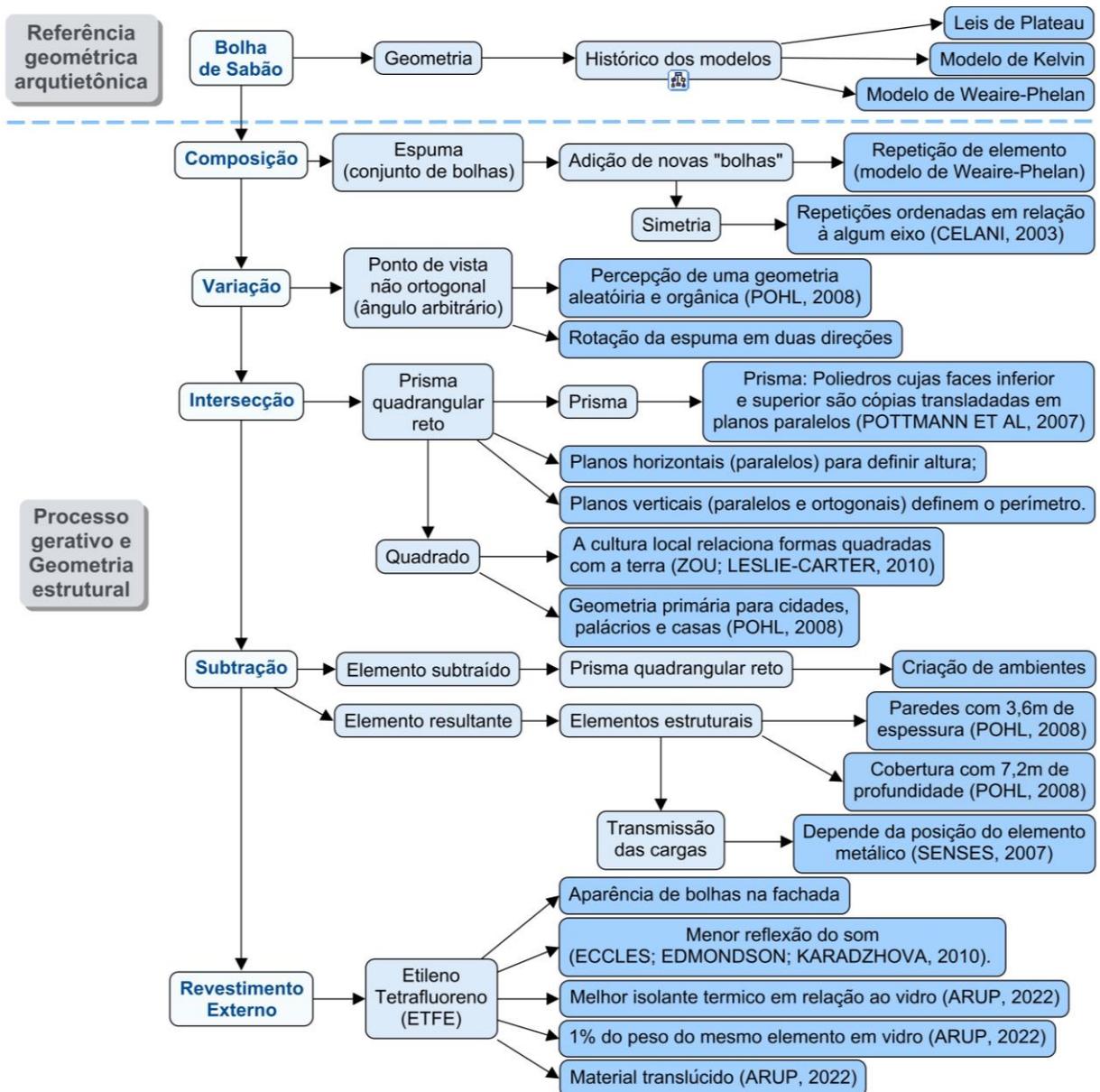


Figura 6.10 Esquema teórico do Water Cube.
 Fonte: Elaboração própria.

Na segunda coluna (na direção vertical) explicitam-se as transformações geométricas aplicadas para gerar a forma final do Water Cube; em cada linha do esquema (no sentido horizontal) são especificados os conceitos presentes e relacionados com as justificativas para sua implementação.

A partir da revisão teórica foi possível identificar que o projeto Water Cube está fundamentado em uma estrutura de saber geométrica intrinsecamente associada com os modelos de bolhas. Devido a isso, busca-se explicitar, em outro esquema visual (Figura 6.11), o saber referente aos modelos de bolha de sabão, a partir dos conceitos que explicam e justificam o seu desenvolvimento histórico (em branco) e a base geométrica de tais modelos (em azul).

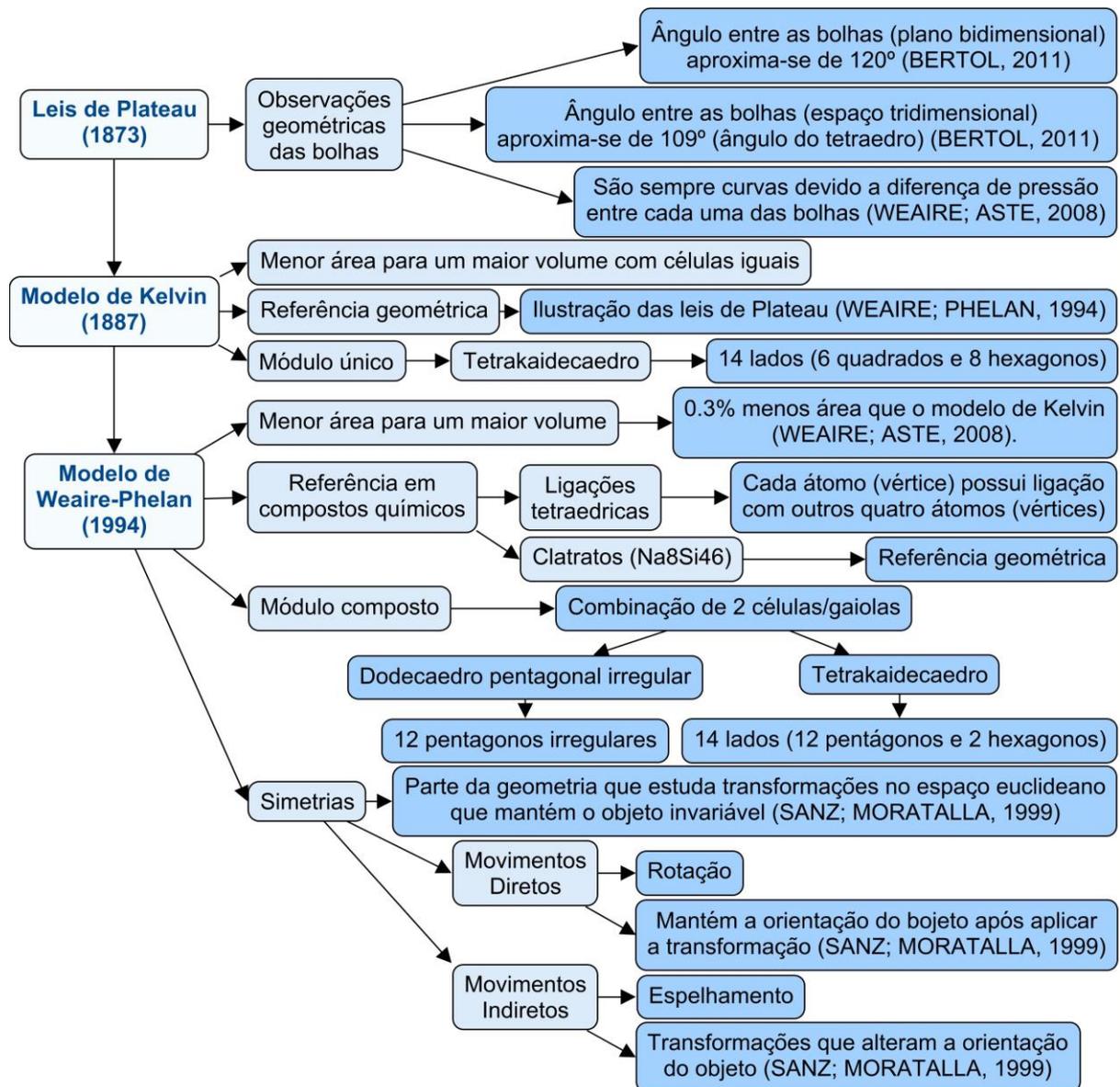


Figura 6.11 Esquema teórico sobre modelos de bolha de sabão.

Fonte: Elaboração própria.

Embora vários autores tentem explicitar a geometria das bolhas de sabão, é apenas com a abordagem de Weaire-Phelan que o modelo geométrico assume sua forma mais otimizada e, por este motivo, é adotado no projeto Water Cube. Seu histórico, que inclui o atendimento às leis geométricas de Plateau e sua origem na química (geometria dos cristais de $\text{Na}_8\text{Si}_4\text{I}_6$), foi importante para reconhecer a geometria de sua estrutura (tetrakaidecaedro e dodecaedro irregular).

Uma das maneiras é por intermédio da modelagem de superfícies líquidas, operacionalizada com o programa "*Surface Evolver*" (SENSES, 2007). Porém, envolve campos de conhecimento que vão além da área da arquitetura, como a física do comportamento dos líquidos. Então, apesar de ser a maneira como Weaire e Phelan obtiveram as geometrias de seu modelo, essa alternativa foge da proposta deste trabalho que se situa no âmbito do ensino de geometria para arquitetura e sua correlação com aplicações da modelagem paramétrica.

A segunda maneira é desenvolvida a partir da lógica apresentada por Elkader e El Gendy (2016), a qual tem por base processos de modelagem de polígonos, linhas, faces e transformações geométricas (Figura 6.12). Inicia pela construção de um losango (Figura 6.12 A) e transformações aplicadas a esse polígono, tais como translação e rotação (Figura 6.12 B e C), que resultam em dois losangos; na sequência os vértices dos dois polígonos são conectados por linhas (Figura 6.12 D e E) para definir a geometria do conjunto de faces e suas superfícies (Figura 6.12 G); depois, transformações de intersecção e subtração são aplicadas nessas superfícies (Figura 6.12 J, K, L, M e N), para a obtenção da geometria final. Com isso, o resultado final é o modelo do tetrakaidecaedro (Figura 6.12 O).

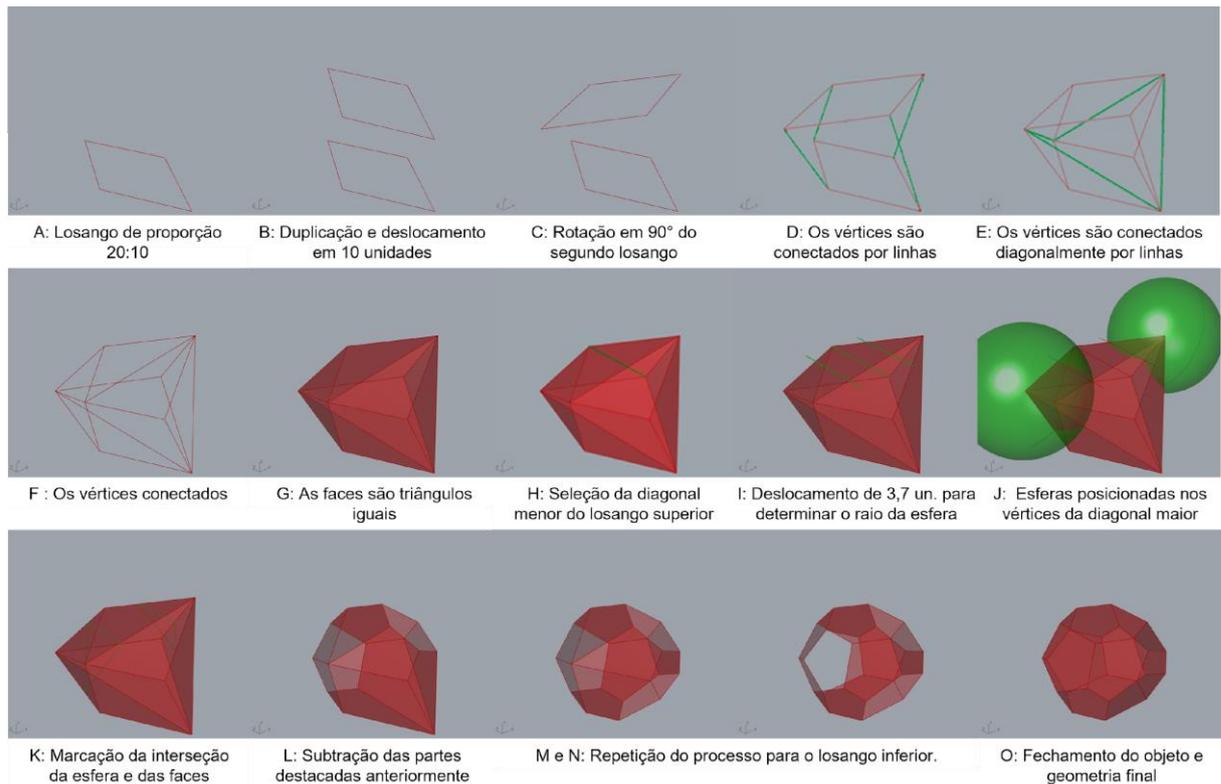


Figura 6.12 Etapas da modelagem do tetrakaidecaedro de Weaire-Phelan a partir da construção e transformação de um sólido.

Fonte: Elaboração própria a partir de Elkader e El Gendy (2016).

Entretanto, a proposta de Elkader e El Gendy (2016) não atende plenamente o proposto neste trabalho, pois, além de não demonstrar a modelagem do segundo poliedro utilizado no modelo de Weaire-Phelan, apresenta complexidade considerando-se a didática que a pesquisa objetiva abordar. Essa complexidade envolve tanto a quantidade de etapas necessárias quanto os tipos de transformações geométricas envolvidas na construção do sólido. Como resultado, foi necessário buscar uma alternativa para obter as células da estrutura utilizada no Water Cube.

A técnica utilizada em Senses (2007) gera o modelo dos dois poliedros a partir de seus vértices. De acordo com a autora, modelar a partir dos vértices, para obter as arestas e depois converter para um modelo sólido, é a opção mais racional e precisa para o processo. Isso porque as operações digitais de seções em sólidos são demasiadamente mais fáceis, em termos informáticos, do que as seções em estruturas geométricas formadas apenas por linhas e/ou superfícies.

A programação da Figura 6.13 refere-se à modelagem dos dois poliedros presentes no modelo de Weaire-Phelan. Ela consiste em modelar os vértices

(pontos), representar polilinhas interpoladas por esses vértices para definir os polígonos das faces, gerar superfícies no interior de cada polígono e, por fim, unir as faces resultantes em um único modelo.

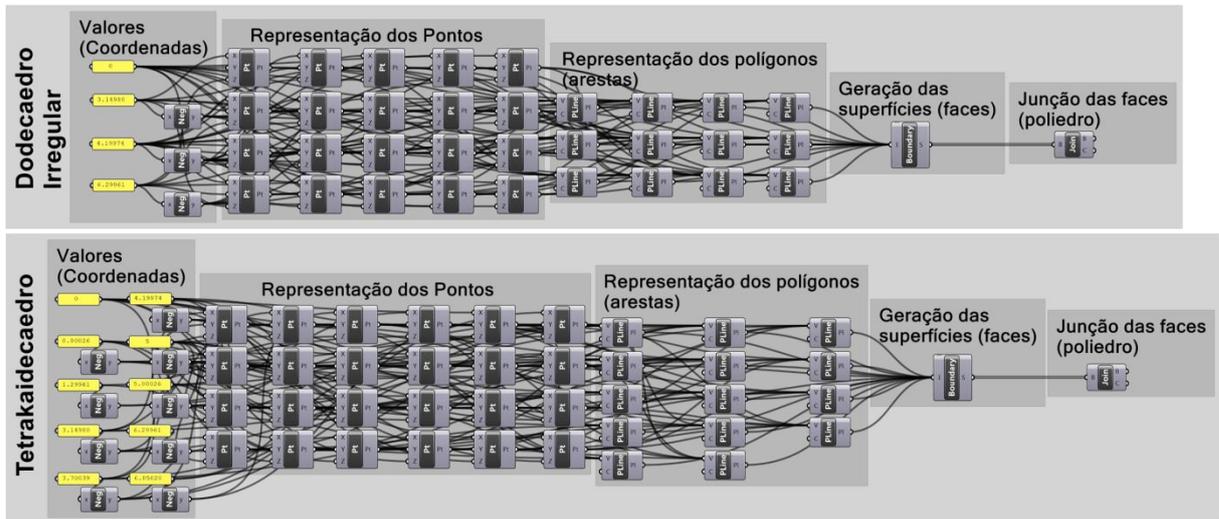


Figura 6.13 Programação para modelagem dos poliedros do modelo de Weaire-Phelan a partir dos vértices.

Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar esta técnica, foi constatado que o processo de modelagem a partir da definição dos vértices é altamente mecânico e envolve repetições de ações que não podem ser automatizadas. Isso ocorre porque é necessário definir manualmente as coordenadas X, Y e Z para cada um dos 44 vértices (20 do dodecaedro irregular e 24 do tetraicaedraedro), utilizando os valores definidos em Inchbald (2022). No entanto, ao adotar esse método como um exercício de modelagem, foi possível obter os dois poliedros e verificar que o tetraicaedraedro modelado corresponde precisamente ao obtido a partir de Elkader e El Gendy (2016).

A Figura 6.14 ilustra as geometrias resultantes dessas programações. Na parte superior são exibidas as vistas do dodecaedro irregular e na porção inferior são as mesmas vistas em relação ao tetraicaedraedro. É importante ressaltar que o modelo proposto por Weaire e Phelan é resultado de um estudo físico sobre o comportamento do líquido, então as faces e arestas apresentavam uma leve curvatura. Porém, com o intuito de destacar as questões estruturais do projeto, a geometria resultante da modelagem foi simplificada: as faces em superfícies planas e as arestas em linhas retas, tal como destacado por Senses (2007).

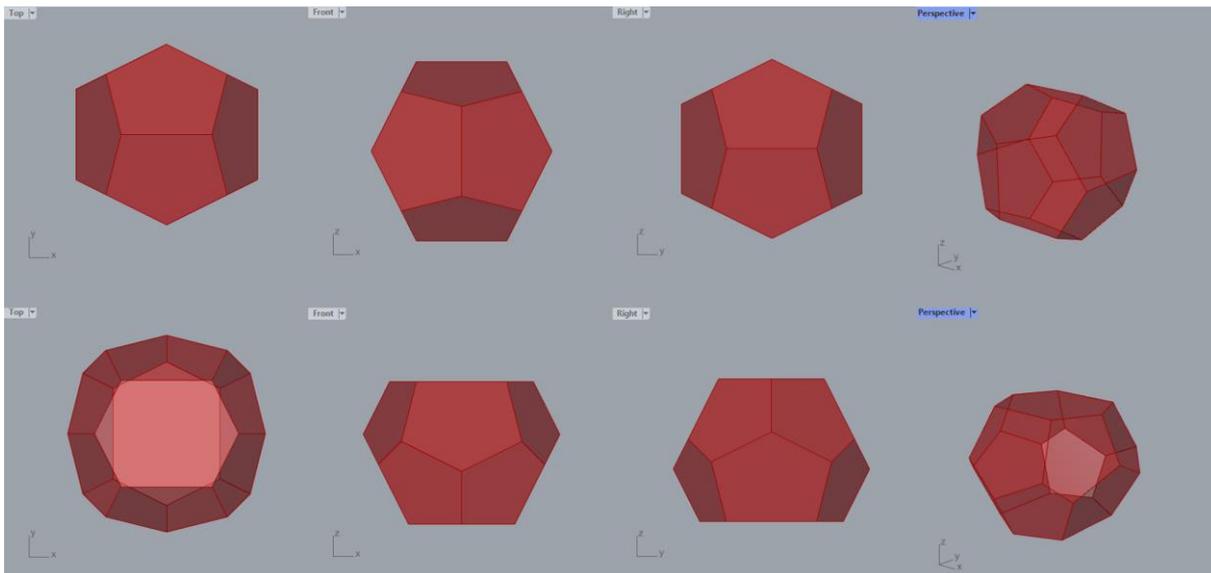


Figura 6.14 Dodecaedro (linha superior) e Tetrakaidecaedro (linha inferior) em vista superior, frontal, lateral e perspectiva.

Fonte: Elaboração própria.

Após a modelagem das células base do modelo de Weaire-Phelan, parte-se para uma análise geométrica, buscando-se compreender o processo de composição subjacente a cada um dos poliedros, começando pela repetição dos diferentes tipos de polígonos que formam as faces (Figura 6.15). O tetrakaidecaedro combina faces pentagonais (A e B) e hexagonais (C), enquanto o dodecaedro irregular é constituído apenas pelo pentágono irregular (A), presente em ambos poliedros.

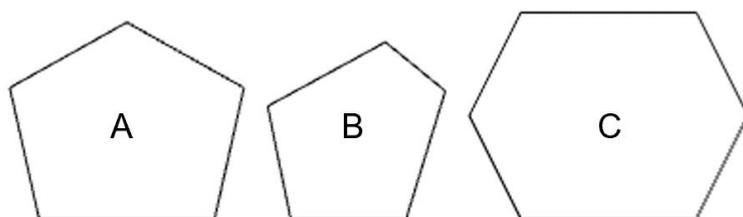


Figura 6.15 Faces pentagonais (A e B) e hexagonal (C) dos poliedros.

Fonte: Elaboração própria.

Segundo Mitchell (1990), a simetria é um grupo de transformações geométricas (translações, rotações, reflexões e composições dessas) que transformam a composição nela mesma. Em outras palavras, a simetria é uma propriedade de manter-se constante sob certas transformações (WEISSTEIN, c2022b; SANZ; MORATALLA, 1999). Nos poliedros aqui analisados, a presença de simetria se caracteriza na repetição de suas faces por intermédio de transformações geométricas, que geram planos de simetria bilateral em diversas projeções, incluindo

vista superior, frontal, lateral e em perspectiva, como observado tanto no tetrakaidecaedro quanto no dodecaedro irregular (Figura 6.16).

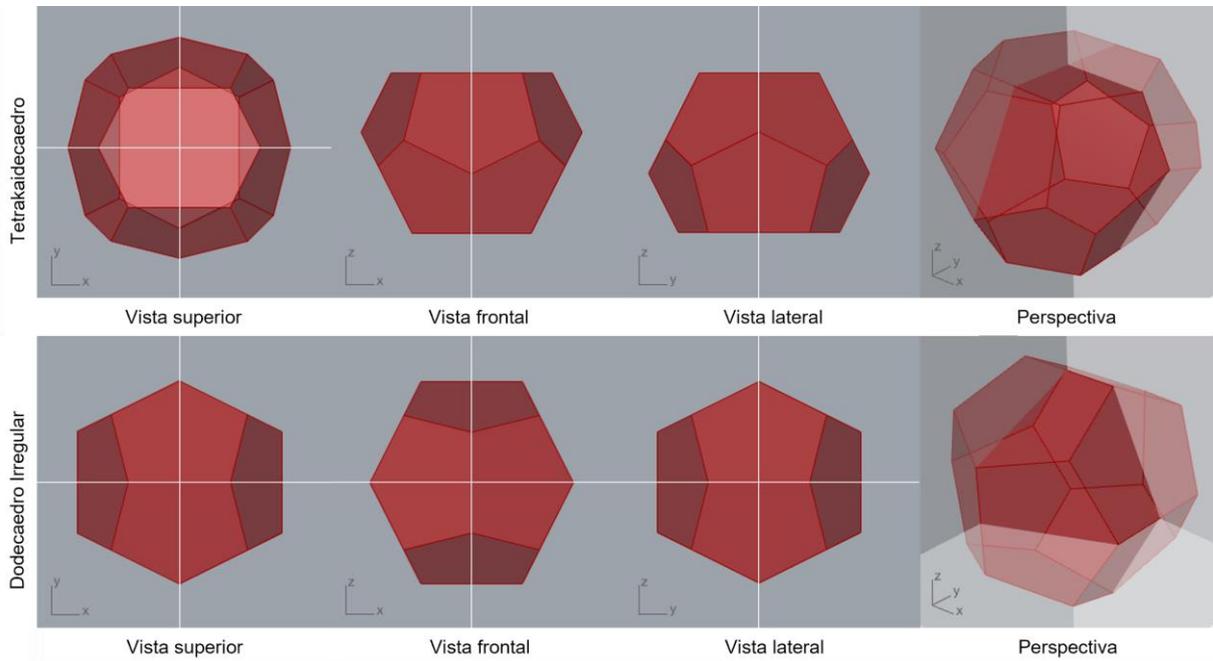


Figura 6.16 Planos de simetria de reflexão bilateral dos poliedros.

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com o conceito de Cromwell (1997), o tetrakaidecaedro tem dois planos verticais de espelhamento, cuja interseção define um eixo de rotação (na vista superior), cujo ângulo necessário para atingir a simetria é de 180° . Por outro lado, o dodecaedro irregular possui dois planos de espelhamento vertical e um plano horizontal, resultando em uma maior quantidade de interseções de planos e, portanto, um maior número de eixos de rotação.

Com base no reconhecimento da presença de simetrias nos poliedros, foi desenvolvido um quarto processo de modelagem das bolhas de Weaire e Phelan, exclusivamente para esta pesquisa. A utilização de conceitos de transformações geométricas foi justificada pelo seu potencial para otimizar as etapas do processo de modelagem e demonstrar como é possível estruturar formas complexas por meio de sua aplicação. O objetivo não é explorar o ambiente paramétrico para obter variações desse modelo, mas evidenciar as relações e transformações geométricas implícitas nele.

Os esquemas visuais da Figura 6.17 e Figura 6.18 sistematizam, respectivamente, as etapas de modelagem por meio dos conceitos geométricos

empregados para o tetrakaidecaedro e para o dodecaedro irregular. A explicitação desta estrutura referente à modelagem paramétrica está descrita no Apêndice B.

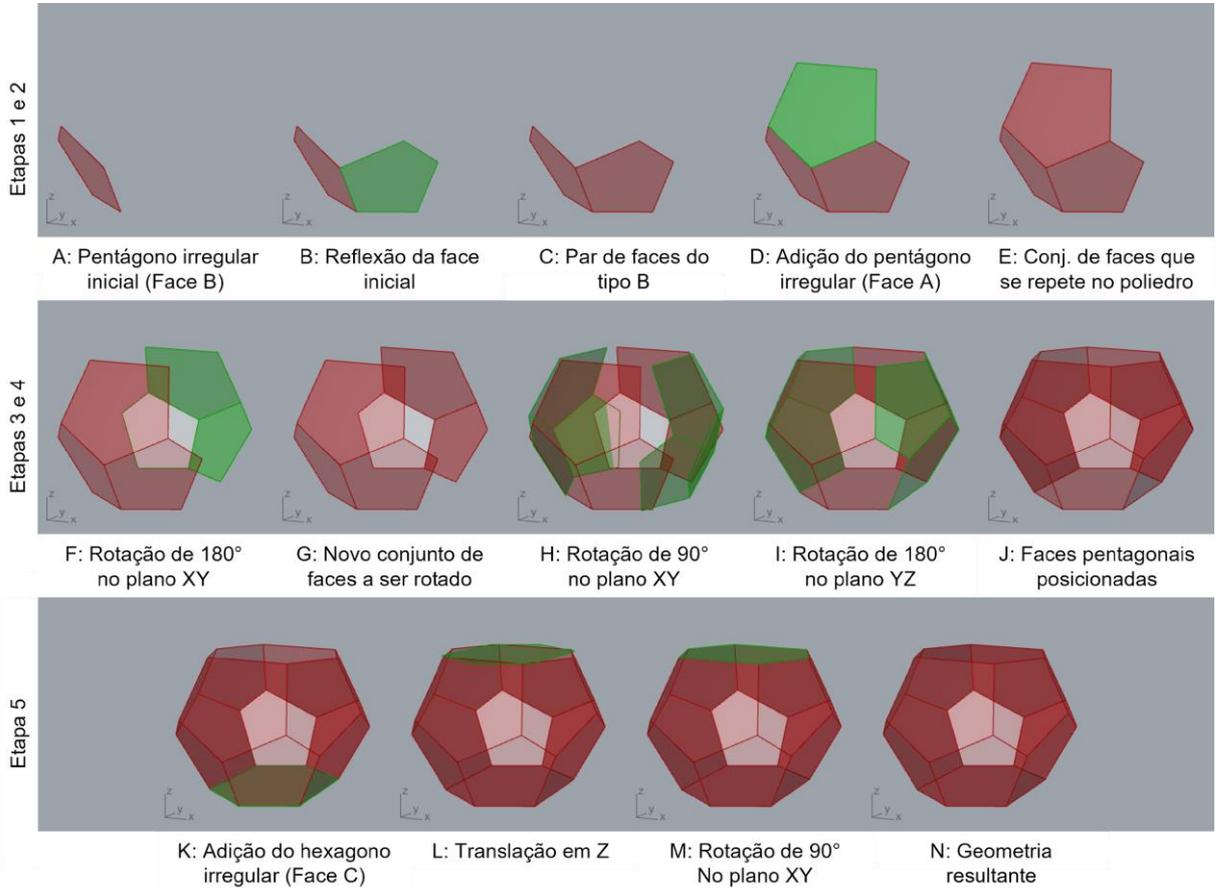


Figura 6.17 Representação gráfica da modelagem do tetrakaidecaedro a partir das transformações geométricas.

Fonte: Elaboração própria.

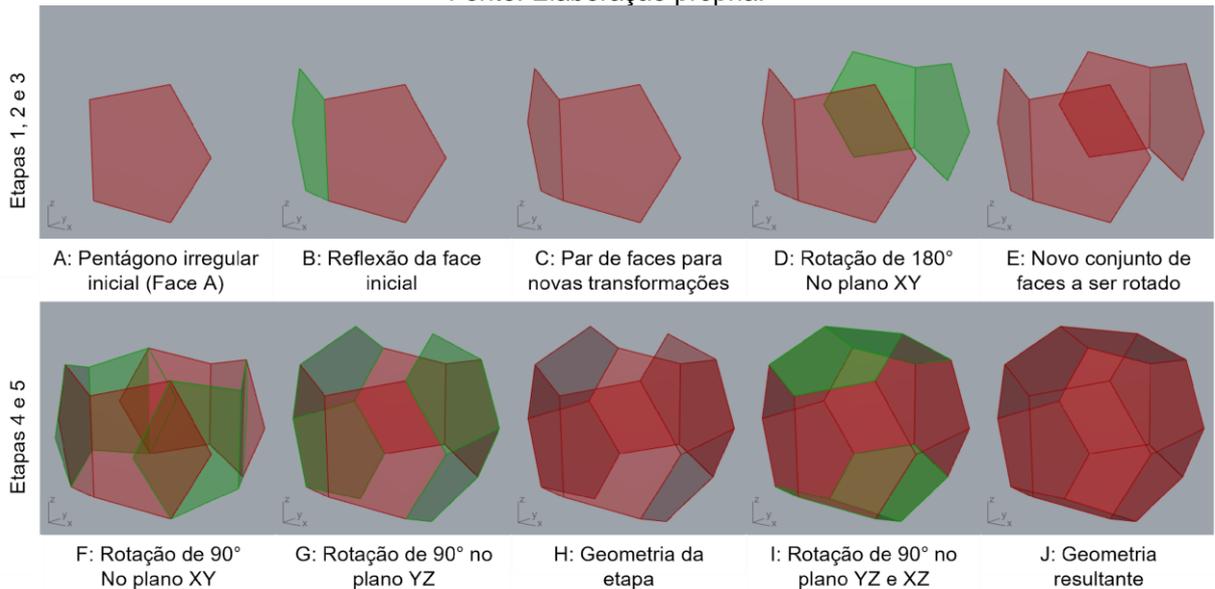


Figura 6.18 Representação gráfica da modelagem do dodecaedro irregular a partir das transformações geométricas.

Fonte: Elaboração própria.

A partir destes processos, obteve-se a modelagem das duas células que representam as bolhas de sabão de Weaire e Phelan. Isso permitiu investigar a lógica geométrica subjacente ao conjunto da espuma, uma vez que o modelo completo é configurado a partir do agrupamento de oito células. No entanto, não se encontraram estudos que explicitassem o posicionamento e as relações entre os poliedros para a obtenção de tal agrupamento, por isso foi necessário desenvolver um processo ao mesmo tempo analítico e exploratório a partir de aplicação de diversas transformações geométricas, conforme as etapas ilustradas na Figura 6.19.

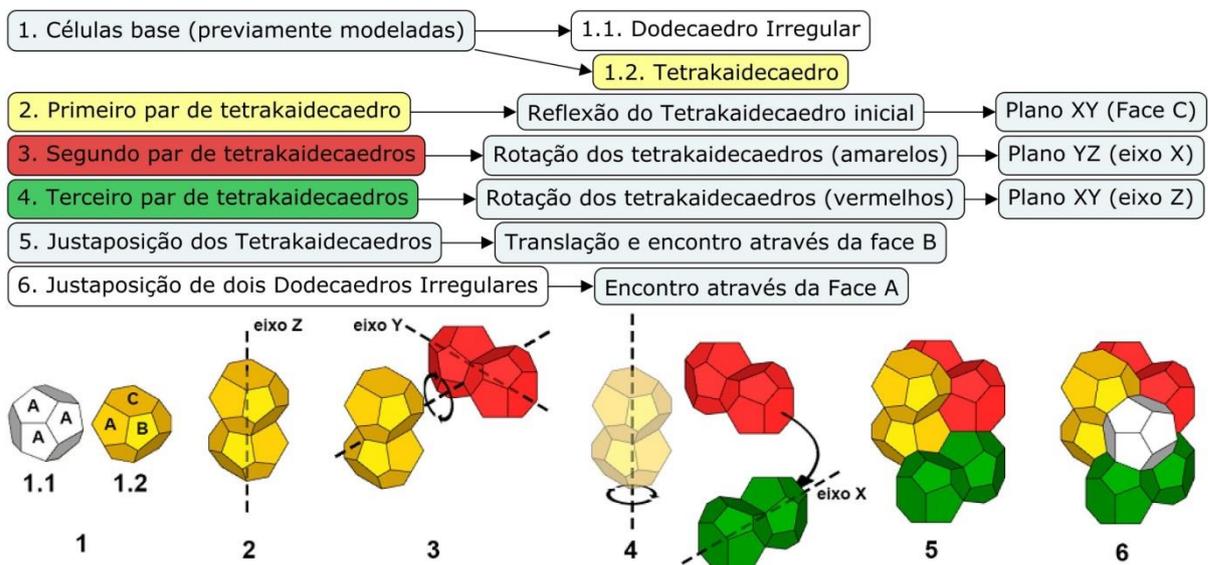


Figura 6.19 Esquema síntese das etapas para a geração do modelo de Weaire-Phelan.

Fonte: Elaboração própria.

Inicialmente, foi essencial observar as faces que compõem os dois poliedros (etapa 1). A face com menor ocorrência é o hexágono irregular (face C), que só está presente no tetrakaidecaedro. E isso conduz a sobreposição do poliedro (etapa 2), por meio do seu espelhamento (reflexão), como único encaixe possível para a face.

A principal dificuldade na criação deste modelo de espuma é garantir a sua periodicidade, ou seja, a capacidade de se repetir infinitamente. Por essa razão, não é possível continuar a construção do modelo apenas aplicando-se a reflexão, sendo necessário outras transformações geométricas, como rotações dos poliedros, para permitir a justaposição de suas faces. Então, na etapa 3, as células amarelas são rotadas em 90° no plano YZ (eixo X), resultando em um segundo par de tetrakaidecaedros (em vermelho). Na etapa 4, são construídos os poliedros verdes, por meio da rotação de 90° no plano XY (eixo Z) das células vermelhas.

Consequentemente, cada par de tetrakaidecaedros (amarelo, vermelho e verde) está posicionado em um dos eixos do plano cartesiano (X, Y, Z). Nesse sentido, a face possível de se encaixar entre os pares de poliedros (etapa 5) é o pentágono irregular menor (face B), presente apenas no tetrakaidecaedro. Por fim, na etapa 6, são encaixados os dodecaedros irregulares através da face A, que é a face semelhante entre os dois diferentes tipos de poliedros.

A programação visual é desenvolvida tendo por base tais etapas (Figura 6.20). A estrutura do saber referente à construção do modelo de Weaire-Phelan, contendo a explicitação da programação, está detalhada e ilustrada no Apêndice C.

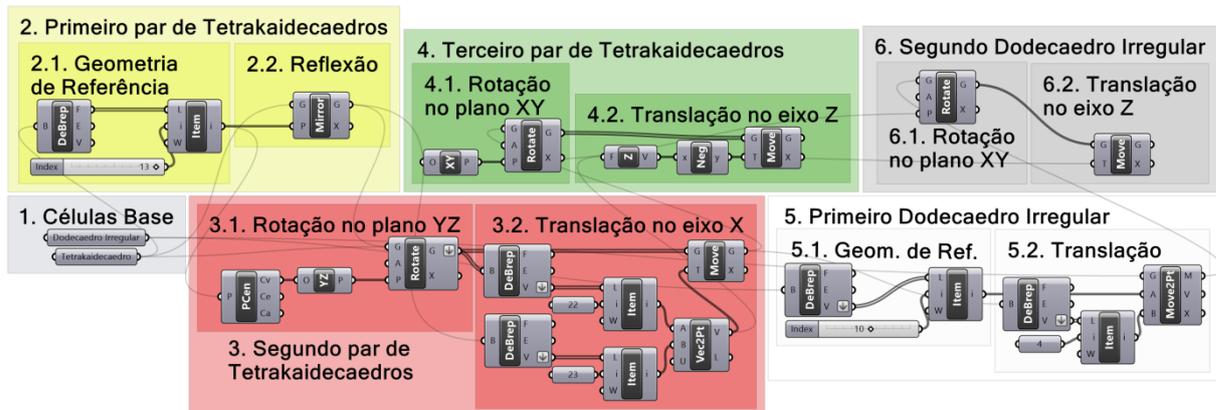


Figura 6.20 Programação visual para o desenvolvimento do modelo de Weaire-Phelan.

Fonte: Elaboração própria.

A sequência de imagens (Figura 6.21) ilustra o resultado de cada etapa da modelagem. Na etapa 1 tem-se as células iniciais: o tetrakaidecaedro (A) e o dodecaedro irregular (B). A etapa 2 (C e D) é a reflexão do tetrakaidecaedro. A etapa 3 (E, F, G e H) é a rotação e translação do segundo par de tetrakaidecaedros. Enquanto que a etapa 4 (I e J) é esse mesmo processo para o terceiro par de tetrakaidecaedros. Já as etapas 5 (K, L, M e N) e 6 (O e P) tem essas mesmas transformações para posicionar cada um dos dodecaedros irregulares.

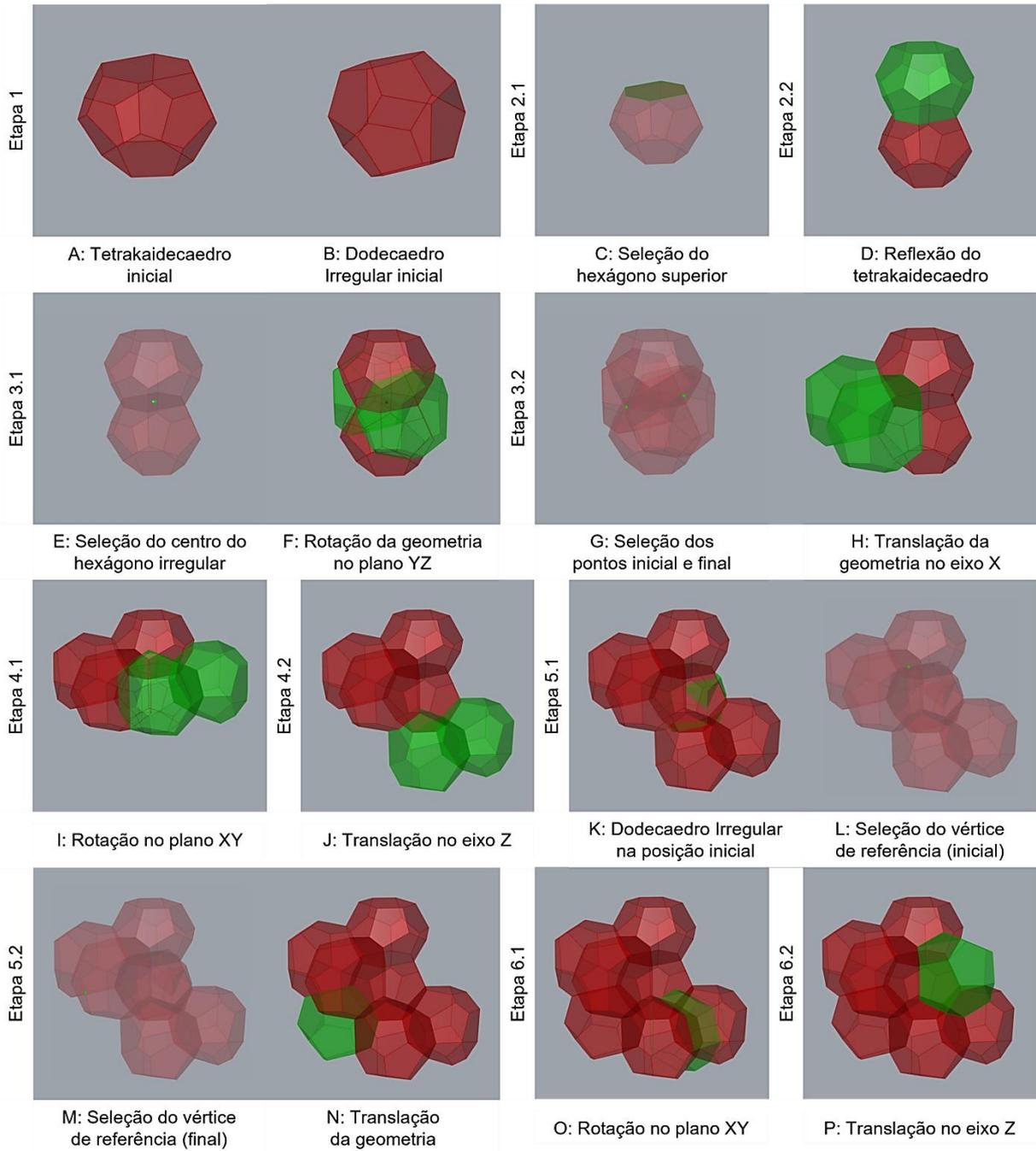


Figura 6.21 Representação gráfica do modelo de WP.
Fonte: Elaboração própria.

Assim é configurado o modelo de Weaire-Phelan (Figura 6.21 P) e é possível avançar para a modelagem do Water Cube. Com base na abordagem de Senses (2007), Pohl (2008) e Zou e Leslie-Carter (2010), estrutura-se um esquema que busca representar a síntese do algoritmo de desenvolvimento do projeto (Figura 6.22). Nele são abordadas as ideias principais subjacentes ao projeto e que, na sequência, serão especificadas e explicitadas a partir da programação visual.

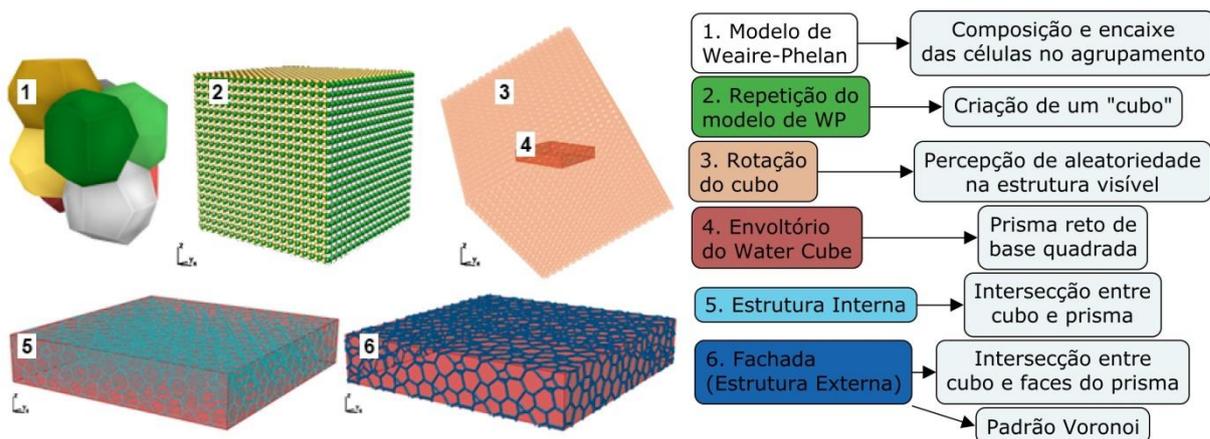


Figura 6.22 Esquema síntese do algoritmo e suas etapas para a geração da forma do Water Cube.
Fonte: Elaboração própria.

A etapa 1 (Figura 6.22), relativa à geração da geometria da espuma, já foi apresentada neste capítulo, uma vez que é considerada importante para o próprio conceito do projeto. As geometrias de Weaire-Phelan foram analisadas desde os diferentes processos de modelagem que compõem as células base até a combinação em um modelo mais complexo (espuma), obtido a partir da análise das faces que formam seus poliedros. E, a partir da etapa 2 (Figura 6.22), estão descritas as transformações geométricas que originaram o projeto do Water Cube.

Como o modelo de WP foi criado com a ideia de repetição e encaixe das faces dos poliedros, essa lógica se mantém na repetição da espuma. A construção da unidade permite que cada lado do modelo de espuma encontre as faces semelhantes no seu lado oposto, possibilitando a conexão de novas estruturas similares e encaixando-as em si mesmo. Essas conexões ocorrem em todos os elementos abordados no processo de construção do modelo de WP, continuamente para cada par de tetrakaidecaedro (amarelo, vermelho e verde), como pode ser visto na Figura 6.23.

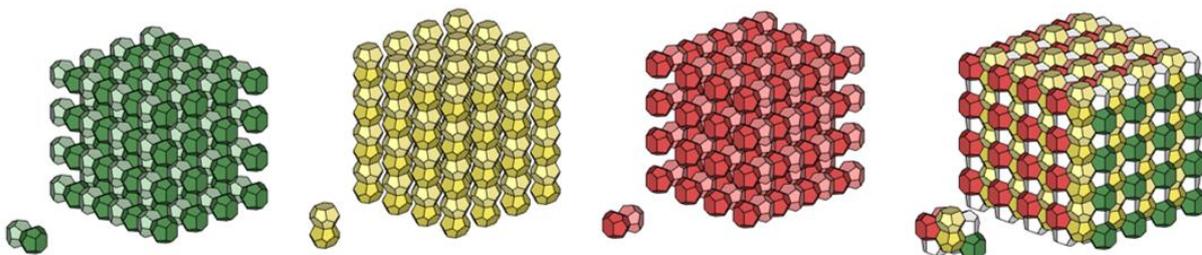


Figura 6.23 Repetição dos tetrakaidecaedros em cada um dos eixos separadamente e em conjunto.
Fonte: Elaboração própria.

Na composição do modelo, essa propriedade de repetição é definida por meio da translação de 19 unidades de espuma em cada direção, formando um “cubo” (etapa 2, Figura 6.22). Em seguida, na etapa 3 da Figura 6.22, o conjunto de bolhas passa por uma série de transformações que garantem a percepção de aleatoriedade para a geometria final. Ou seja, o cubo é rotado em dois eixos distintos para que a repetição da geometria não seja tão evidente. Depois, há a definição de um prisma reto de base quadrada como o envoltório do Water Cube (etapa 4, Figura 6.22), bem como a sua interseção com o conjunto de bolhas rotado (etapa 5, Figura 6.22). Externamente, a intersecção da estrutura com as faces do prisma define um padrão na edificação, conhecido como diagrama de Voronoi (etapa 6, Figura 6.22).

A partir desse esquema síntese do projeto foi possível dar continuidade ao processo de modelagem que complementa a explicitação das técnicas e tecnologias implícitas na estrutura do saber do Water Cube. Na Figura 6.24 está a programação visual referente às etapas explicitadas no esquema síntese da forma do projeto (Figura 6.22), que aborda o processo de transformação da sua geometria. E, no Apêndice D, estão detalhadas e ilustradas cada uma dessas etapas.

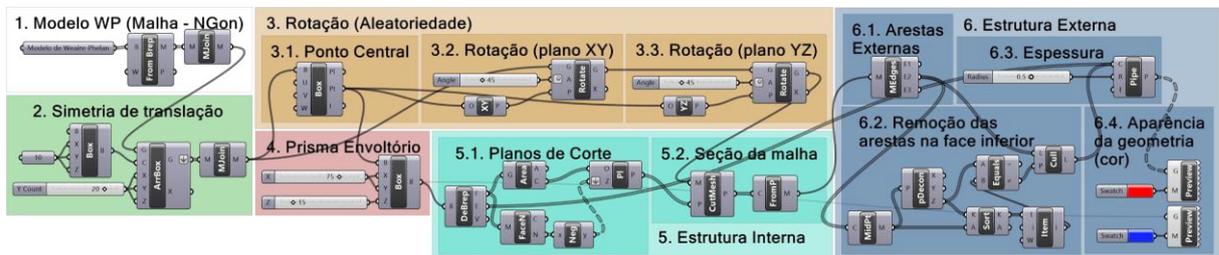


Figura 6.24 Programação visual para o desenvolvimento do modelo do projeto do Water Cube.
Fonte: Elaboração própria.

As imagens da Figura 6.25 são referentes às etapas da programação do modelo geométrico do projeto do Water Cube (Figura 6.24). A primeira etapa (A) representa a geometria inicial do projeto, o modelo de Weaire-Phelan. A etapa 2 (B e C) é a repetição do modelo para construção do cubo. Já a etapa 3 (D, E e F) são os processos de rotação do modelo. A etapa 4 (G e H) é a definição do prisma envoltório. A etapa 5 (I, J, K e L) é a intersecção entre o cubo e o prisma, definindo a estrutura interna do Water Cube. E a etapa 6 (M, N, O e P) é a seleção e demarcação da estrutura metálica da fachada.

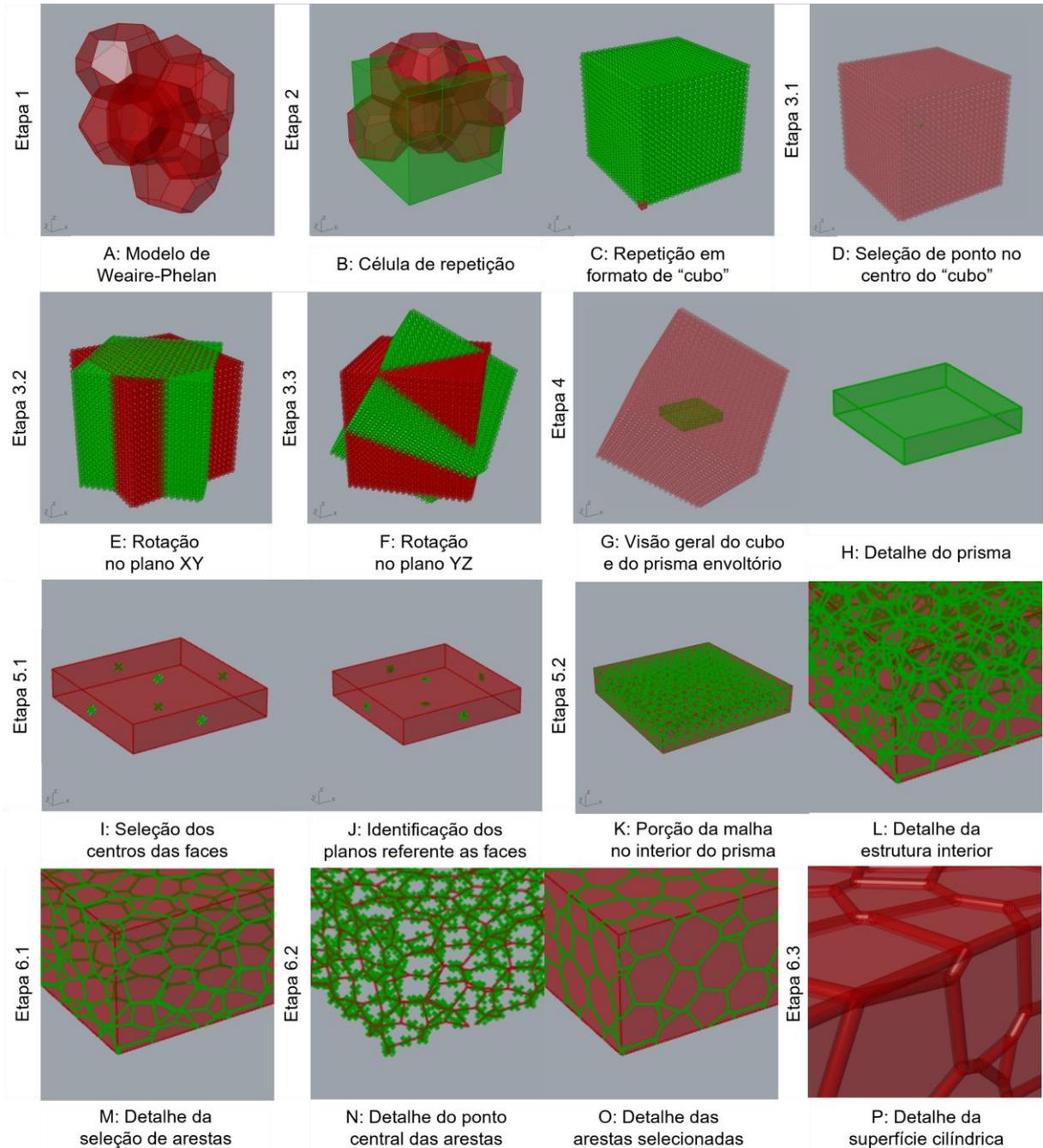


Figura 6.25 Representação gráfica do modelo do Water Cube.

Fonte: Elaboração própria.

O resultado final da modelagem, já com a alteração da aparência dos elementos (etapa 6.4) está na Figura 6.26. Em azul está definido o prisma e em vermelho as arestas que configuram o padrão de Voronoi.

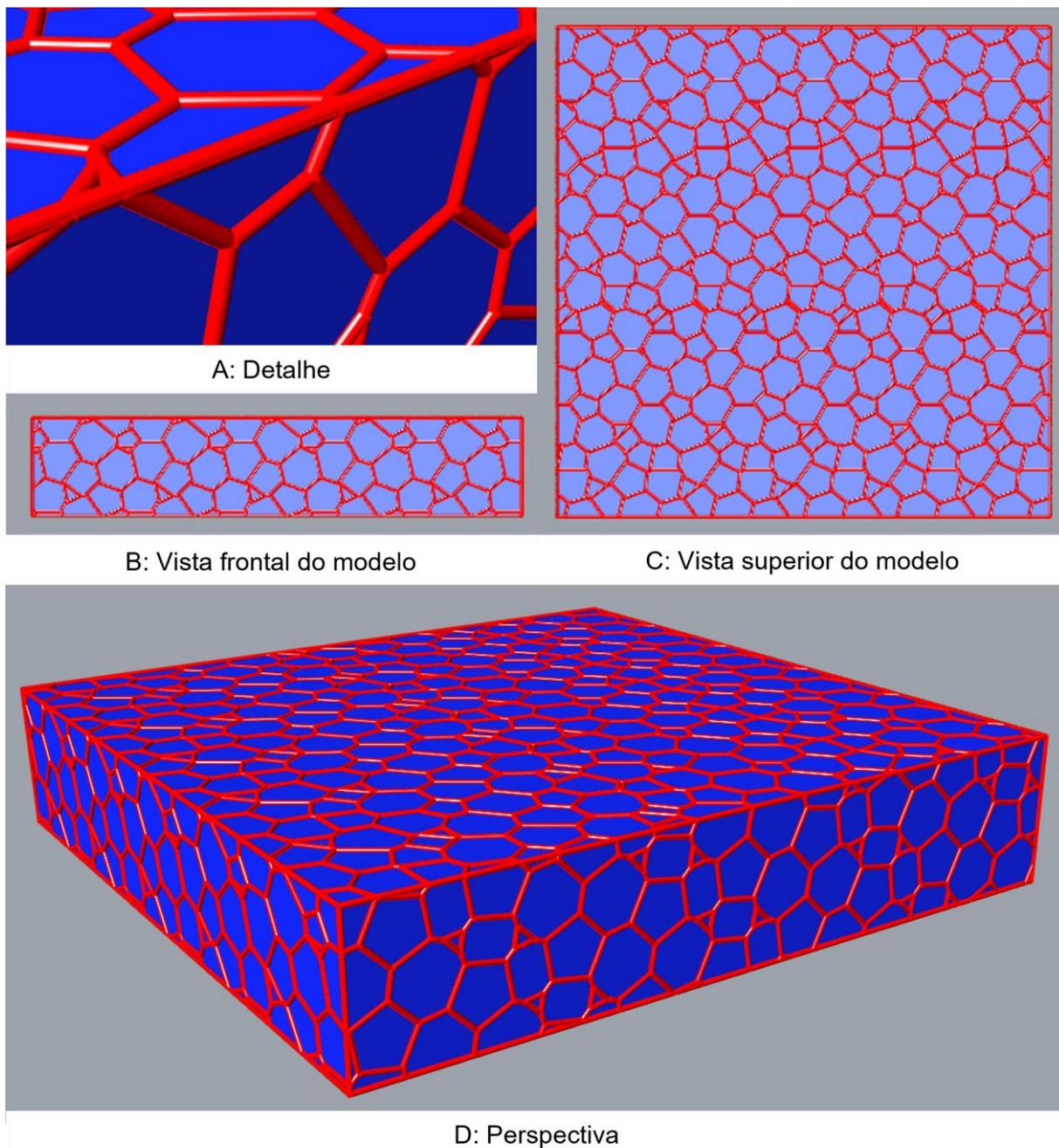


Figura 6.26 Modelo final do Water Cube.
Fonte: Elaboração própria.

Segundo Senses (2007), o processo de projeto original emprega a modelagem a partir de modelos sólidos (poliedros) e somente depois de definida a forma geométrica da edificação é que a malha é aplicada com finalidade de promover a otimização estrutural. Nesse sentido, o conjunto de sólidos é transformado em uma malha, sendo as faces dos poliedros utilizadas como as faces da malha. Dessa forma, pode-se considerar a função de tesselação do projeto do Water Cube, uma vez que a malha é aplicada em uma geometria existente.

Porém, o emprego da malha no processo de modelagem desenvolvido para esse trabalho ocorreu em um momento anterior. Depois de definido o modelo de Weaire-Phelan, este é gerado como um sólido e convertido em malha. Essa antecipação da tesselação foi feita para simplificar e reduzir a quantidade de polígonos do modelo, com o propósito de facilitar o processamento computacional. Pois o tipo de modelo (sólido) presente no software adotado é configurado por faces triangulares, o que aumenta consideravelmente a quantidade de polígonos. Quando se aplica uma malha por meio do plugin *Ngon*, a malha construída passa a ter faces mais complexas (com pentágonos ou hexágonos), mas em menor número, otimizando o processamento computacional.

Durante a revisão de literatura identificou-se a aplicação de transformações no cubo (aglomerado de bolhas do modelo) para promover a percepção de aleatoriedade à estrutura. O conjunto é rotado em duas direções para criar esses padrões aparentemente aleatórios da fachada. Porém, segundo o diretor da PTW Architecture, John Bilmon (WIRED, 2007), os ângulos não são resultados de escolhas dos projetistas, mas do processo de otimização da geometria. Bilmon complementa que tais processos buscavam um equilíbrio entre variar a aparência da fachada e um padrão nas bolhas e suas arestas metálicas, para facilitar a fabricação dos elementos. Além disso, essa otimização demandou um processamento computacional combinado entre computadores da Arup e PTW, e ainda assim levou semanas para encontrar a forma.

No entanto, este tipo de otimização a partir de ferramentas específicas que aliam a busca da forma com aspectos de racionalidade construtiva foge do escopo desta pesquisa, que busca explicitar a estrutura do saber envolvida na geometria e representação gráfica da obra em questão. Para tanto, se concentrou em abordar os parâmetros de rotação do modelo da espuma, referenciados apenas nos valores de ângulos para atingir a forma final do projeto. Nesta direção, buscou-se o valor exato que resultou em uma a posição similar a imagem em perspectiva isométrica, apresentada pelos arquitetos do projeto e ilustrada em Hwang (2007).

6.2. Revisão das classificações quanto ao tipo de face e função da malha no Water Cube

Com base no conteúdo analisado neste capítulo, retomam-se os conceitos apresentados na revisão de literatura referentes à classificação das malhas no

projeto do Water Cube. Para tal, são abordados os tipos de faces e as funções da malha no projeto, por meio de tabelas comparativas.

A partir das análises sobre os aspectos compositivos da forma (intersecção da espuma com as faces do prisma envoltório), é confirmada a presença do padrão de Voronoi, anteriormente identificado nas faces da malha (Tabela 6.1). Porém, a malha presente no projeto do Water Cube não se limita apenas à fachada da edificação. A obtenção do padrão irregular na fachada foi identificada a partir da intersecção de uma estrutura extremamente regular com o prisma envolvente. Nesse sentido, a estrutura interna do projeto é composta por uma malha que consiste na repetição de duas células: o tetrakaidecaedro e o dodecaedro irregular. Ou seja, a malha presente no interior do projeto é a combinação das três faces analisadas no início desse capítulo. Portanto, além das faces irregulares com o diagrama de Voronoi, a geometria das faces do Water Cube pode ser considerada como semirregular, combinando polígonos não regulares em um único padrão de malha.

Nesse sentido, as faces externas continuam sendo classificadas como irregulares, a partir do diagrama de Voronoi. Enquanto que as faces internas são oriundas da repetição ordenada das faces do tetrakaidecaedro e do dodecaedro irregular, sendo classificada como faces semirregulares, por combinar mais de um polígono.

Tabela 6.1 Classificação do Projeto Éden quanto à geometria das faces da malha.

Geometria das Faces no Water Cube			
		Inicial	Pós Est. do Saber
Regular	Triângulo		
	Retângulo		
	Hexágono		
Semi Regular			Malha Interna
Irregular	Diag. de Voronoi		Malha Externa
	Triang. de Delauney		

Fonte: elaboração própria.

Depois, em relação às funções da malha identificadas durante a análise do projeto do Water Cube, foram reconhecidas novas aplicações, conforme apresentado na Tabela 6.2. Algumas dessas funções não eram explícitas nos discursos dos arquitetos - tomados como escopo da revisão de literatura - e foram

compreendidas somente com as análises do projeto - a partir de outros autores e da explicitação da sua estrutura de saber.

Tabela 6.2 Função da malha no Water Cube.

Função das Malhas no Water Cube		
	Inicial	Pós Est. do Saber
Representação Digital		
Computacional		
Tesselação		
Otimização da Forma		
Otimização Estrutural		
Geração da Forma		

Fonte: elaboração própria.

A tesselação é a transformação de uma geometria em malha. Essa aplicação da malha está diretamente relacionada aos processos de otimização no Water Cube, conforme anteriormente descrito. Ao se aplicar a malha no início do processo de modelagem paramétrica, a tesselação passa a ter uma função de representação digital. Esta, simplifica as formas complexas em figuras elementares – os triângulos que compõem as faces da malha. A combinação da tesselação e da representação digital, permite que modelos complexos sejam manipulados em computadores de menor capacidade de processamento. E é justamente o que ocorreu na modelagem do Water Cube para essa pesquisa, que foi necessário alterar a sequência do processo de geração da forma para se obter as malhas nas etapas iniciais e, com isso, viabilizar as transformações geométricas. Nesse sentido, em vez de abordar as transformações a partir da repetição de sólidos, passa-se a ter isso para as malhas pois aceleram o processamento computacional e a visualização do modelo.

A função computacional por se referir à malha como um sistema organizacional estabelece que os dados do modelo sejam numerados, corroborando e facilitando a fabricação das peças a partir de cada elemento da malha. Nesse sentido, a complexa estrutura da obra se organiza de maneira sistemática a partir da numeração dos elementos integrantes da malha. É importante destacar que, embora essa função da malha seja útil para o projeto e execução do Water Cube, ela não foi incluída na programação visual desenvolvida para esta pesquisa, que se concentra nos conceitos geométricos da forma.

Além disso, também se confirma a função identificada na etapa inicial de revisão de literatura. A otimização estrutural é alcançada no modelo, visto que os responsáveis utilizam da geometria de referência formal do projeto como elemento estrutural do mesmo. Para isso, é a malha que permite a otimização da estrutura, os cálculos de transmissão de força, de esforços em cada elemento e consequentemente a alteração das espessuras para compor a estrutura da obra que atenda ao grande vão livre exigido pelo programa de necessidades.

6.3. Análise e discussão de resultados

Projetos como a Biosfera de Montreal e o Projeto Éden são estruturados a partir da geometria das geodésicas, ou seja, tem sua origem relacionada com a esfera. Nesse sentido, as geodésicas apresentam certa complexidade na sua configuração por exigir compreender processos projetivos de vértices de um poliedro regular sobre a esfera de origem, para configurar uma geometria otimizada, o que contribui com novos elementos de saber para o contexto de arquitetura. Enquanto que o Projeto Éden aborda as geodésicas como referência geométrica/arquitetônica para as bolhas de sabão, o desenvolvimento do processo de projeto do Water Cube mantém a mesma lógica, porém, tem como base conceitual de referência a espuma formada por um agrupamento de bolhas de sabão, cujas geometrias são ainda mais desconhecidas na arquitetura.

Similar ao que ocorre com o Projeto Éden, o desenvolvimento do projeto que deu origem ao Water Cube possui estrutura de saber que aborda processos equivalentes (similares), aumentando a sua complexidade compositiva. Ambos convergem para uma mesma sequência de etapas processuais, desde a referência até o processo gerativo e a geometria estrutural. Nesse sentido, compartilham etapas como a referência à bolha de sabão, o revestimento externo e, principalmente, a sequência de transformações do processo gerativo, que incluem composição, variação e intersecção.

No entanto, a estrutura referente ao processo que ocorre junto ao Water Cube difere-se pelo fato de que seus processos gerativos e a geometria estrutural foram definidos em conjunto (com o intuito de integrar o projeto arquitetônico e estrutural). Apesar disso, os elementos de saber teóricos puderam ser mantidos em relação ao Projeto Éden. Dessa maneira, pode-se dizer que, apesar de serem projetos

completamente diferentes, possuem estruturas de saber similares ou compartilham parte de estas estruturas.

Essa estrutura tem origem na referência geométrica de um elemento da natureza. O Projeto Éden utiliza a bolha de sabão e um agrupamento desses elementos como inspiração formal. Por outro lado, o processo presente no Water Cube explora a geometria das próprias bolhas para propor a estrutura do prédio. Ou seja, enquanto a estufa de Cornwall se concentra no comportamento das bolhas, limitando-se às leis de Plateau, o Centro Aquático de Pequim avança no estudo da geometria das bolhas/espuma e dedica-se à representação geométrica desses elementos, utilizando o modelo de Weaire-Phelan.

Questões pertinentes ao processo gerativo também são compartilhadas entre os projetos a partir dos elementos de saber envolvidos em processos de composição, variação e intersecção. O Projeto Éden tem sua composição a partir da adição de novas bolhas/esferas, seguindo um eixo formado por linhas com direções variáveis e com elementos diferenciáveis em escalas distintas. Enquanto que no Water Cube a inserção de novos elementos se dá pela repetição (linear) de um conjunto de bolhas, em três direções.

A variação formal presente no Projeto Éden resulta da modificação dos parâmetros em cada bolha, os quais afetam o diâmetro e a frequência dos domos. Em contrapartida, no Water Cube, a variação é percebida por intermédio da ideia de aleatoriedade das moléculas de água, conforme o modelo de Weaire-Phelan. Dado que o modelo apresenta duas unidades distintas e é composto por repetições em grande número, a variação ocorre na rotação da espuma, permitindo uma percepção aleatória desses elementos na fachada. Logo, não há variação na estrutura geométrica dos elementos, mas sim na sua percepção quando seccionados para a composição da fachada.

Ainda quanto ao processo gerativo, a intersecção está presente nos dois projetos, porém de maneira diferente. No Projeto Éden, a intersecção ocorre entre as bolhas como uma maneira de somar e remover sobreposições entre elas. Já no Water Cube, são os planos que cortam o conjunto de bolhas, limitando o projeto a um envoltório que representa um prisma retangular de base quadrada.

Por fim, as semelhanças também ocorrem além das questões formais do projeto arquitetônico, avançando para a tomada de decisão junto ao projeto, como ocorre com a definição do revestimento. Ambos os prédios utilizam o ETFE inflado no padrão geométrico das malhas. No Projeto Éden seu uso está atrelado à função de uma estufa, devido às propriedades do material. No Water Cube, apesar dos benefícios em se utilizar esse plástico na fachada, ele reforça o conceito do projeto, uma vez que o revestimento é inflado, replicando a curvatura e aparência de bolhas.

Para além da análise comparativa dos projetos, o Water Cube se destaca em outras questões inerentes ao processo de projeto paramétrico. Devido à complexidade do seu conceito e geometria adotada, todas as etapas de projeto, análise, simulação e também aquelas relacionadas com a fabricação e montagem ocorreram originalmente por meios digitais.

Identificou-se que o processo gerativo e por consequência o de modelagem do Water Cube é o que está mais intimamente relacionado ao uso de malhas para otimização. Isso porque a geometria abordada no projeto original não poderia ser facilmente modelada com as tecnologias de representação disponíveis no contexto dessa pesquisa. Foi a partir da representação com malha que se viabilizou a modelagem da obra. Consequentemente, possibilitou uma abordagem mais integral do saber, visto que não só buscou representar o processo original, mas adaptá-lo para o contexto de ensino alvo desta pesquisa, por meio das malhas.

Capítulo 7

Estudo do Pavilhão Shellstar

7. A descrição do Pavilhão Shellstar

O pavilhão Shellstar, ilustrado na Figura 7.1, representa uma estrutura arquitetônica efêmera concebida como ponto de encontro para o festival de arte e design Detour em 2012, em Wan Chai, Hong Kong. Seu projeto se baseou no uso de avançadas tecnologias digitais de modelagem, simulação e fabricação, visando à criação de uma estrutura inovadora, dinâmica e icônica para o período de duas semanas do evento (MEAN, c2023).



Figura 7.1 Vistas noturnas (aérea e perspectiva externa) do pavilhão Shellstar.
Fonte: Matsys (c2022)

Situado em um terreno baldio no distrito de Wan Chai, o projeto foi concebido com a intenção de incentivar os visitantes a se deslocarem em direção ao centro do pavilhão durante os intervalos do evento e, em seguida, retornarem ao festival. A Figura 7.2 ilustra um recorte do mapa da região, com o terreno destacado em vermelho, evidenciando sua proximidade com o local do evento, em azul.

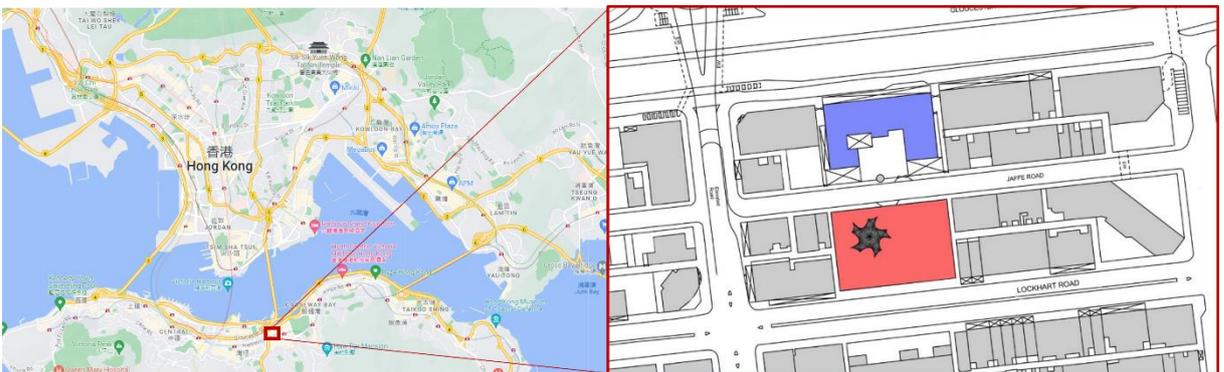


Figura 7.2 Planta esquemática de localização, destacando o local do evento (azul) e o terreno que recebeu o Pavilhão Shellstar (vermelho).
Fonte: Modificado a partir de Matsys (c2022).

O conceito é de autoria do renomado arquiteto Andrew Kudless, do escritório Matsys, em colaboração com Riyad Joucka, da Universidade de Hong Kong

(MATSYS, c2022). O objetivo da proposta era otimizar o desempenho espacial ao mesmo tempo em que minimizava a estrutura e a quantidade de material utilizado. Para isso, os arquitetos utilizam-se de um modelo geométrico e sua otimização por simulação de forças físicas em ambiente de modelagem paramétrica, permitindo o desenvolvimento, fabricação e montagem do projeto em um prazo de seis semanas.

O pavilhão é resultado de um sistema emergente que integra forma, material e performance em um único processo (MEAN, c2023). De acordo com Andrew Kudless, o processo de design foi dividido em três etapas distintas: a geração de formas, a otimização da superfície e o planejamento da fabricação (MATSYS, c2022). Para realizar essas etapas foram utilizadas várias tecnologias, incluindo o software *Rhinceros* e seu plugin *Grasshopper*, o plugin *Kangaroo* para simulação de forças físicas, o plugin *LunchBox* e programação em *Rhinoscript* e *Python*.

Neste estudo será abordada a primeira etapa do processo, que se concentra na busca da forma, através da exploração e explicitação dos conceitos de geometria integrados ao desenho paramétrico. A configuração do pavilhão surge de um processo baseado nas técnicas clássicas de modelagem física que foram desenvolvidas por Antoni Gaudí para a obtenção de superfícies otimizadas. Matsys se apropriou dessas técnicas paramétricas e as replicou em modelagem digital para definir a forma do projeto. A Figura 7.3 apresenta um esquema que ilustra o processo de configuração original do Pavilhão Shellstar.

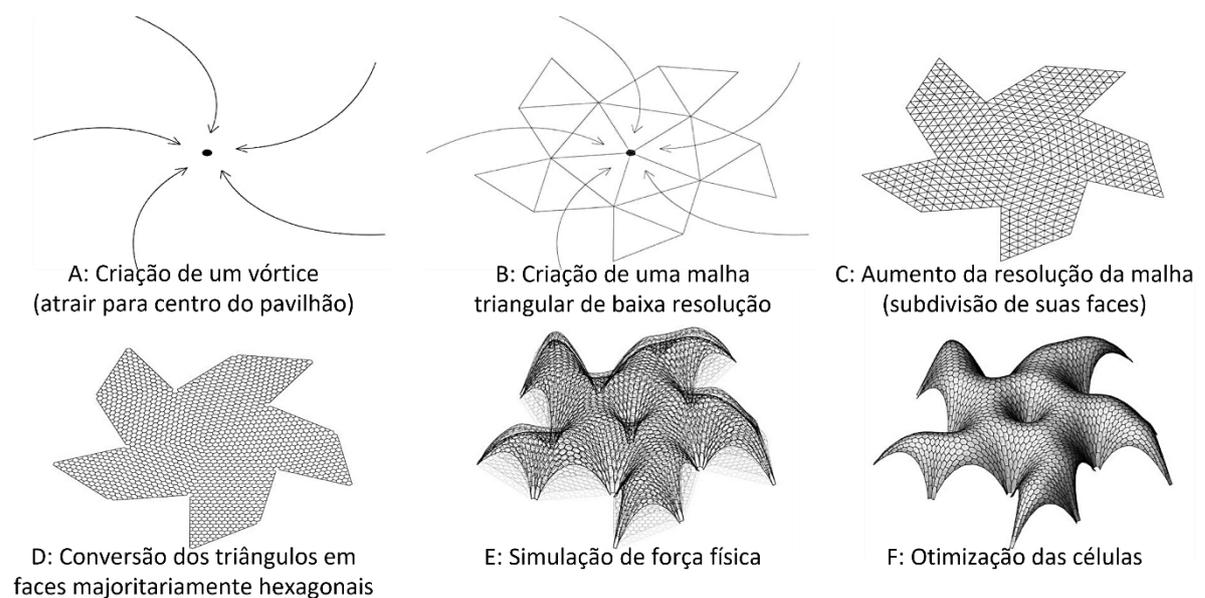


Figura 7.3 Diagrama esquemático do processo de projeto de desenvolvimento do Pavilhão Shellstar. Fonte: Modificado a partir de Matsys (c2022).

O projeto teve, como ponto de partida, a ideia de criar um vórtice espacial (Figura 7.3 A) que pudesse atrair os visitantes em direção ao centro do pavilhão (MATSYS, c2022). A partir disso, sua geometria foi inspirada em estruturas naturais, inicialmente na orquídea de cinco pétalas, um símbolo icônico presente na bandeira de Hong Kong (MEAN, c2023), como pode ser observado na Figura 7.4. Nesse sentido, a referência da flor não configura a forma tridimensional do pavilhão, mas a sua projeção no plano (Figura 7.3 B). Assumindo, assim, a geometria do que os responsáveis chamam de uma “estrela” de cinco pontas.



Figura 7.4 Fotografia em detalhe da flor da orquídea de Hong Kong e fotografia da bandeira dessa cidade.

Fonte: Mercadante (2010) e Ancheta-Adrias (2008).

Para estabelecer o perímetro da projeção dessa flor, Matsys (c2022) define a relação entre os pontos dessa geometria no plano horizontal, conforme o esquema gráfico, em perspectiva, que está disponível no site do escritório. O esquema dessa geometria foi feito em projeção paralela ortogonal (Figura 7.5 A) para que fosse possível desenvolver uma análise geométrica, visando caracterizar os tipos de polígonos obtidos com a interligação dos pontos. Inicialmente, distinguiram-se as diferentes arestas que compõem o módulo, ilustrado na Figura 7.5 B. Depois, buscou-se a conformação dos triângulos a partir dessas arestas, identificando a presença no módulo de dois triângulos isósceles e um equilátero, que se repetem em simetria de rotação ao redor do ponto central do pentágono, formando a figura da estrela (Figura 7.5 C).

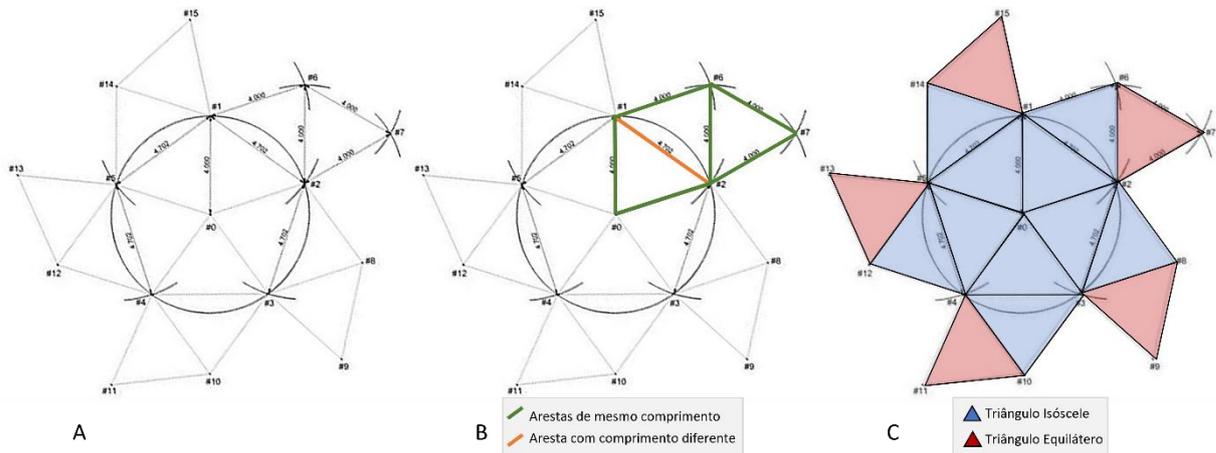
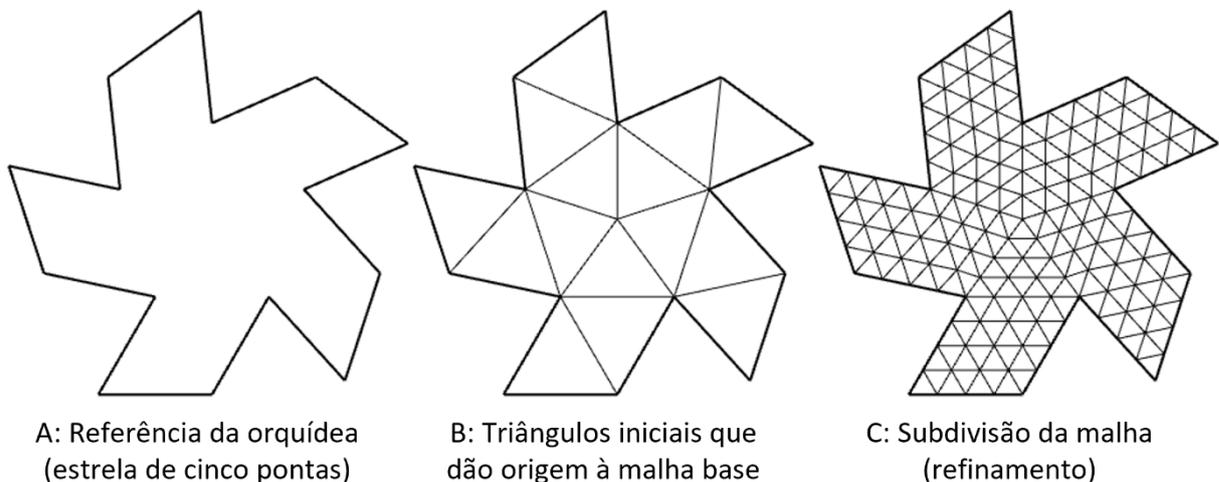


Figura 7.5 Processo de análise da geometria base (estrela de cinco pontas) do Pavilhão Shellstar a partir do esquema gráfico dos pontos iniciais.
Fonte: Modificado a partir de Matsys (c2022).

Ao centro existe um arranjo de cinco triângulos isósceles, rotados no ponto central da estrela, os quais formam um pentágono. Contíguos aos lados do pentágono estão dispostos mais cinco triângulos isósceles (espelhados em relação aos cinco primeiros) e que também estão em um arranjo por simetria de rotação em relação ao ponto central. Os triângulos mais externos, na cor vermelha, são equiláteros.

Essa projeção da flor no plano horizontal (Figura 7.6 A), dividida em triângulos maiores, é configurada como uma malha, em um processo chamado de tesselação (Figura 7.6 B). Nesse sentido, cada triângulo inicial será abordado como uma face da malha. Em seguida, essa malha é subdividida para aumentar sua resolução (MATSYS, c2022). Ou seja, suas faces são divididas em diversos triângulos menores, aumentando o número de elementos da malha (Figura 7.6 C).



A: Referência da orquídea (estrela de cinco pontas)

B: Triângulos iniciais que dão origem à malha base

C: Subdivisão da malha (refinamento)

Figura 7.6 Processo de tesselação e subdivisão da malha inicial do Pavilhão Shellstar.
Fonte: Elaboração própria a partir de Matsys (c2022).

Depois, ocorre o processo de transformação das faces triangulares da malha em seus polígonos duais. As faces inicialmente triangulares são convertidas em elementos hexagonais. A Figura 7.7 apresenta a projeção da estrela com os padrões triangulares (Figura 7.7 A), a sobreposição dos dois padrões (Figura 7.7 B) e o padrão hexagonal (Figura 7.7 C). Faz-se necessário destacar que, de acordo com os responsáveis pelo projeto, essa configuração é considerada majoritariamente hexagonal, ou seja, não é totalmente hexagonal, pois o elemento central da estrela (a face no centro da superfície, destacada em vermelho na Figura 7.7 C) é um pentágono.

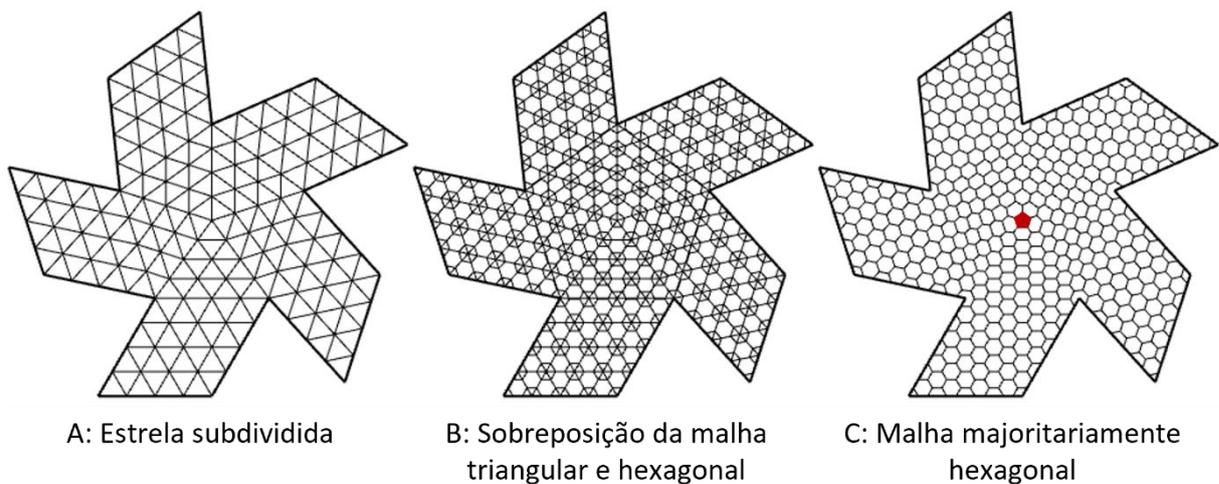


Figura 7.7 Processo de transformação das faces triangulares da malha inicial em polígonos hexagonais.

Fonte: Elaboração própria a partir de Matsys (c2022).

A próxima etapa do processo se baseia em estruturas puramente em compressão, abordadas por arquitetos e engenheiros renomados, como Antônio Gaudí, Frei Otto e Félix Candela (MATSYS, c2022). O objetivo é permitir que o pavilhão Shellstar seja construído com uma quantidade mínima de material, em uma camada fina, e cobrindo uma grande área (MEAN, c2023).

Este processo é semelhante ao realizado com curvas catenárias para obter arcos em pura compressão, em que tais curvas ficam submetidas à deformação da gravidade até alcançar um equilíbrio estável (a partir da tensão), sendo após invertidas para a definição da curvatura dos arcos em compressão (HUERTA, 2009). Na modelagem digital do projeto foi utilizado o plugin *Grasshopper*, juntamente com seu componente de forças físicas, o *Kangaroo*, para configurar uma forma alinhada com os vetores estruturais (MATSYS, c2022). Na Figura 7.8 está ilustrado o

processo, partindo da malha hexagonal (Figura 7.8 A) e aplicação/simulação das forças físicas (Figura 7.8 B), para obter a estrutura em compressão (Figura 7.8 C).



Figura 7.8 Processo de aplicação e simulação das forças físicas na malha hexagonal do Pavilhão Shellstar.

Fonte: Elaboração própria a partir de Matsys (c2022).

A forma do pavilhão é curvilínea e fluida, composta por uma série de arcos entrelaçados que se unem para criar uma cúpula com formato de concha, conforme ilustrado na Figura 7.8 C. Essa geometria retoma a referência em estruturas encontradas na natureza, nesse sentido, as conchas marinhas, que são uma fonte adicional de inspiração para o projeto devido à sua relação com o porto próximo ao local do pavilhão (MEAN, c2023).

Os arquitetos, após conceberem a estrutura em forma de concha para o pavilhão, seguiram com os processos de otimização da forma. Para tal, realizaram análises de desempenho da estrutura, verificando o momento fletor (Figura 7.9 A), a deflexão (Figura 7.9 B) e o estresse do plano (Figura 7.9 C). Com base nesta análise, eles reconstruíram e modificaram a malha da estrutura até alcançarem um resultado satisfatório em termos de desempenho (MATSYS, c2022).

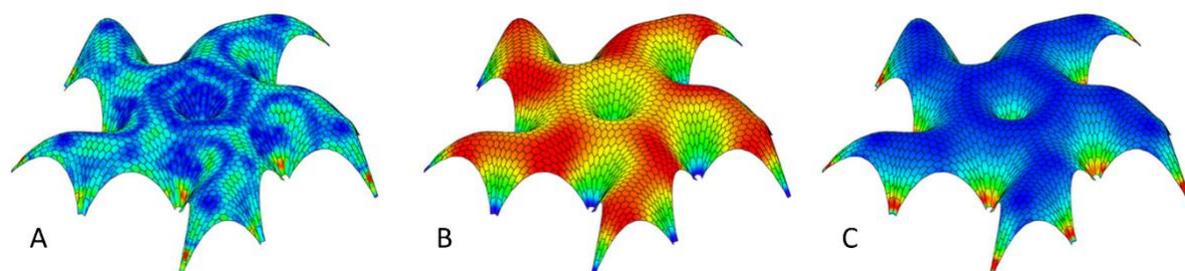


Figura 7.9 Análise estrutural do pavilhão Shellstar para momento fletor (A), deflexão (B) e estresse do plano (C).

Fonte: Matsys (c2022).

O projeto apresenta um padrão de superfície constituído por aproximadamente 1500 células que foram otimizadas individualmente visando simplificar o processo de fabricação (MATSYS, c2022). Isso porque, as células devem possuir uma leve flexibilidade para se ajustarem à curvatura global da forma, porém são cortadas a partir de um material plano. Nesse sentido, a otimização não se restringe apenas à superfície, mas também às peças que recebem tratamento por meio de scripts em *Python*, sendo preparadas para fabricação a partir do desenvolvimento de flanges (elementos de ligação) e rótulos (MATSYS, c2022).

Além da otimização das células para torná-las mais planas, outra estratégia adotada no projeto foi a incorporação de perfurações nas células. De acordo com Matsys (c2022), essa abordagem foi implementada para otimizar a iluminação do espaço. Por questões estruturais, para as células localizadas em níveis mais baixos da estrutura foi removido menos material de cada unidade, resultando em perfurações menores. Por outro lado, à medida que as peças se elevam na estrutura, as perfurações são aumentadas, proporcionando maior passagem de luz e contribuindo para uma distribuição adequada da iluminação natural no interior do pavilhão.

As células foram projetadas em Coroplast, uma fibra de vidro translúcida que permite a entrada da luz natural no interior da estrutura. Foi necessário o alinhamento das peças com os sulcos do material, um processo que também foi automatizado por meio de scripts. A Figura 7.10 aborda detalhes do projeto e planificação (A) e montagem com braçadeiras em nylon (B) dos encaixes das células, além de uma vista interna do pavilhão que demonstra o efeito visual da iluminação natural no projeto (C).

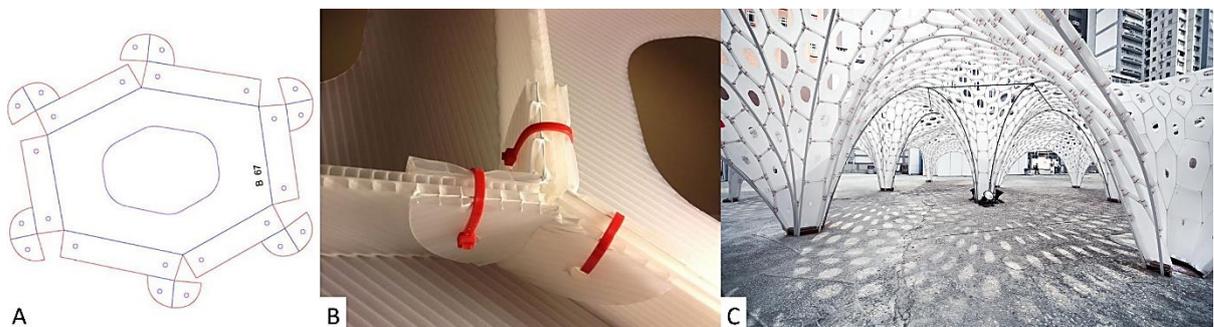


Figura 7.10 Planificação (A), detalhe dos encaixes das células (B) e perspectiva interna do Pavilhão Shellstar (C).

Fonte: Matsys (c2022).

7.1. Estrutura de saber do Pavilhão Shellstar

A partir das informações obtidas por meio de análises do discurso, diagramas e imagens dos responsáveis pelo projeto, foi possível explicitar a estrutura de saber que representa a obra em seus aspectos geométricos. Em um primeiro momento, não foi possível explicitar o saber associado à definição da malha com a inclusão de um pentágono no centro do padrão formado por hexágonos. Isto porque não se encontrou referenciais sobre a construção do padrão em malha com tal configuração.

Assim, buscou-se apoio nas contribuições de outros pesquisadores que se dedicaram à representação digital da Shellstar, tal como Singla (2019) e Raghu (2019), que deram prioridade a investigar o processo de geração por simulação de forças físicas em detrimento da representação fiel da própria forma. Nesse sentido, a proposta de modelagem atua como um reconhecimento de um processo de obtenção da geometria tridimensional e, mais do que isso, uma primeira abordagem às forças físicas. Na Figura 7.11 está ilustrado um esquema estrutural desenvolvido por Raghu (2019) referente ao Pavilhão Shellstar, cuja forma base da estrela (no plano) tem seis pontas em vez de cinco.

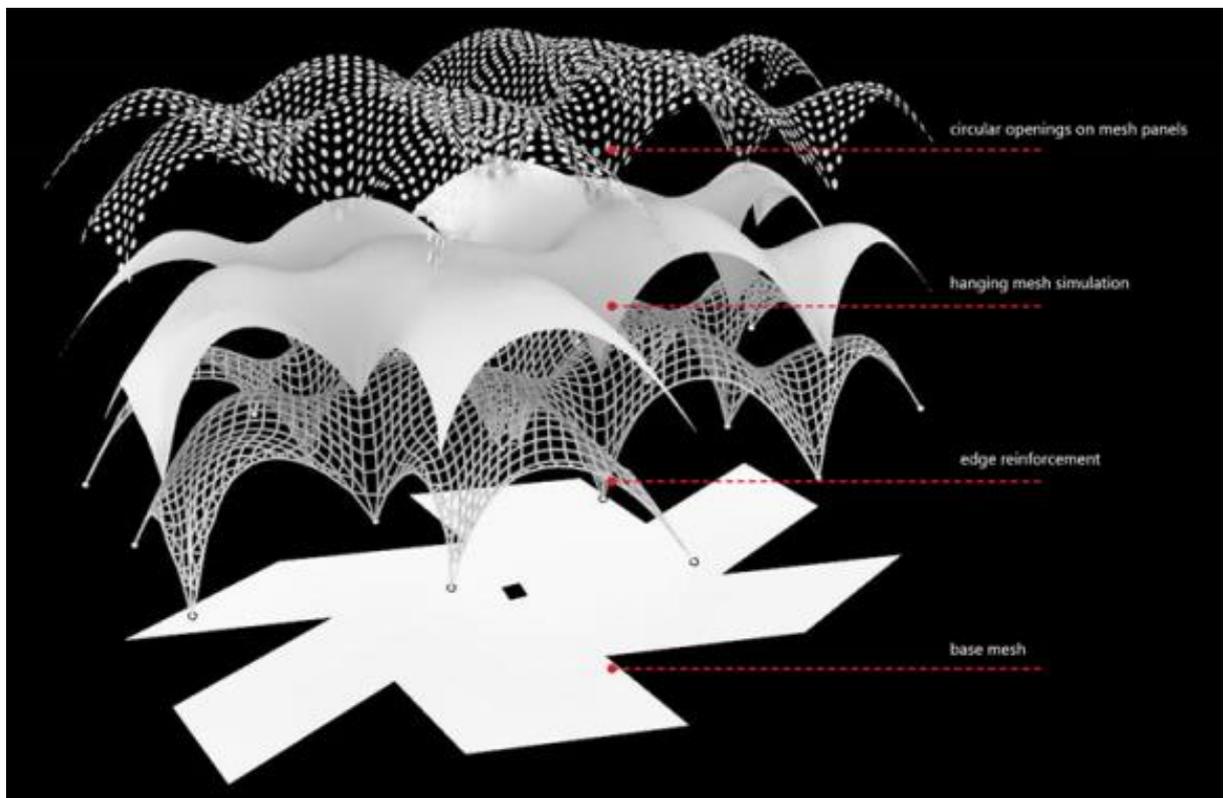


Figura 7.11 Esquema de camadas do processo de geração da forma da Shellstar.
Fonte: Raghu (2019).

Embora a alteração para uma estrela de seis pontas em vez da estrela de cinco pontas, o processo de configuração da geometria tridimensional seguiu sendo o mesmo da forma original do projeto. Na Figura 7.12 está o comparativo das duas estrelas, a primeira com a malha triangular e a figura de um pentágono no centro da malha (A), a segunda com a figura de um hexágono (B).

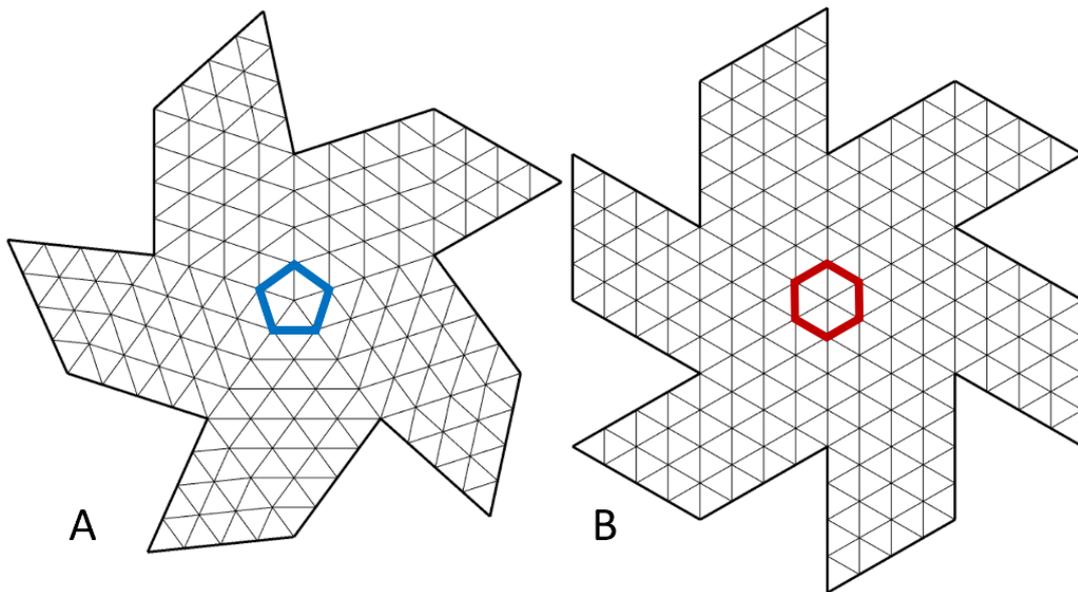


Figura 7.12 Comparativo entre as estrelas de cinco e seis pontas, com suas figuras centrais destacadas: em azul o pentágono e em vermelho o hexágono.
Fonte: Elaboração própria.

Inicialmente, a malha hexagonal não poderia ser resolvida de maneira regular na configuração de uma estrela de cinco pontas devido à incompatibilidade na estrutura interna da malha (polígonos que definem as faces). Em outras palavras, o pentágono central não se encaixaria em um padrão regular de hexágonos, somente quando os hexágonos apresentam deformações, o que inicialmente tornou complexa a representação da malha. No entanto, no processo desenvolvido por Singla (2019) e Raghu (2019), o polígono central da estrela foi modificado para um hexágono, superando essa limitação. A partir desta modificação na geometria, foi possível representar a malha hexagonal e preencher as lacunas que até então estavam presentes em relação à geometria e ao processo empregado no projeto da Shellstar.

Depois de se identificar uma solução para a padronização das faces da malha a partir da figura central de um hexágono, sistematizou-se uma primeira estrutura de saber que explicita a obra em seus aspectos geométricos, como pode ser visto na Figura 7.13. No eixo vertical são elencadas as transformações geométricas e construtivas da forma, enquanto que no sentido horizontal são apresentadas as

especificidades de cada conceito adotado na geração de tal forma, acompanhadas de descrições e justificativas de suas aplicações na arquitetura. Essa representação visual permite uma compreensão clara das diferentes etapas do processo e das decisões tomadas em cada uma delas, proporcionando uma visão abrangente do desenvolvimento da forma do projeto.

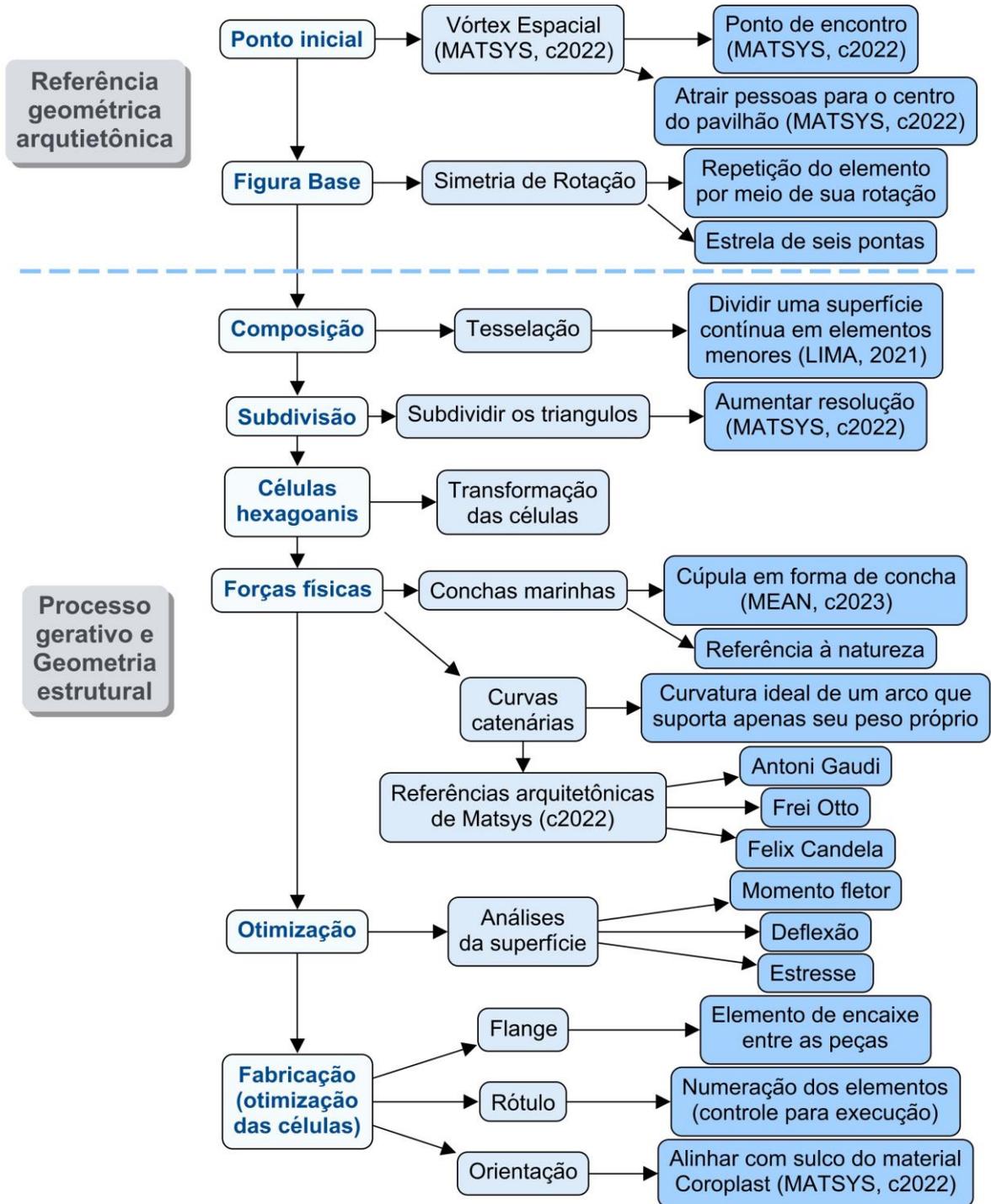


Figura 7.13 Esquema teórico inicial do Pavilhão Shellstar.
 Fonte: Elaboração própria.

Até então, o saber relacionado à geometria da obra se baseava em definições e explicações teóricas, oriundas do discurso dos responsáveis técnicos pelo projeto e do processo de modelagem desenvolvido em Singla (2019) e Raghu (2019). Com o intuito de complementar essa estrutura de saber, amplia-se a pesquisa com a exploração das técnicas de geração associadas às tecnologias de representação digital. Nesse sentido, propõem-se a modelagem paramétrica conceitual do Pavilhão Shellstar. Para tanto, procurou-se estruturar um esquema (Figura 7.14) que representasse a síntese do algoritmo (aqui entendido como as etapas do processo de representação) utilizado no desenvolvimento do projeto.

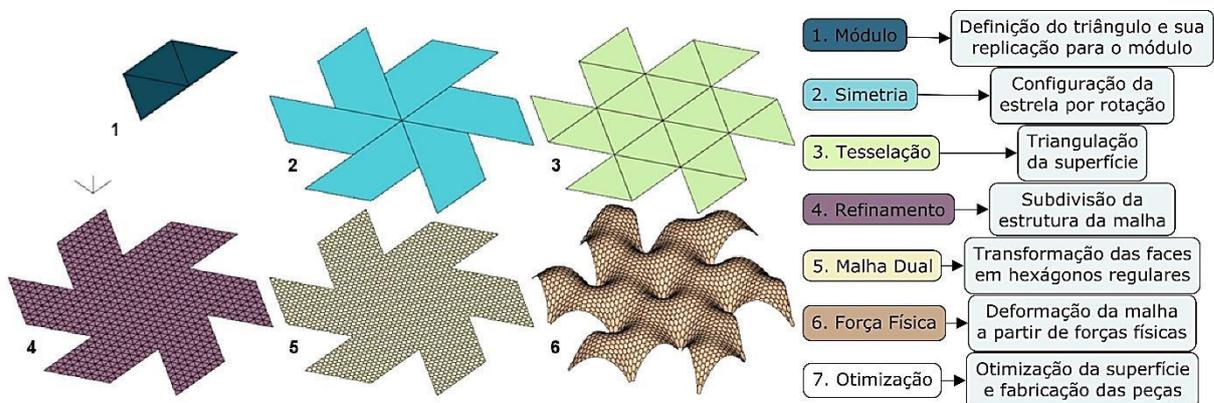


Figura 7.14 Esquema síntese do algoritmo inicial e suas etapas para a geração da forma da Shellstar. Fonte: Elaboração própria.

Com isso, são estabelecidas as etapas que caracterizam o processo de projeto da Shellstar, como segue: 1) definição do módulo composto por um conjunto de triângulos; 2) a configuração da estrela de seis pontas a partir da aplicação de simetria de rotação; 3) a tesselação da superfície, ou seja, transformação da superfície em malha; 4) o processo de refinamento, em que cada uma das faces triangulares é subdividida para aumentar a resolução e precisão; 5) a transformação da malha resultante em sua malha dual; 6) aplicação de forças físicas como principal processo de geração da forma, utilizando técnicas disponíveis no plugin Kangaroo para simular o comportamento estrutural e a deformação sob essas forças visando buscar a forma final do projeto. 7) e os processos de otimização, tanto da superfície como das células individuais, com o objetivo de prepará-las para fabricação e garantir eficiência e qualidade no resultado final, embora essa última etapa não seja desenvolvida no decorrer dessa pesquisa.

Seguindo estas etapas, o processo de modelagem é especificado por meio da programação visual, conforme apresentado na Figura 7.15, e detalhado em partes de acordo com as etapas representadas na Figura 7.16.

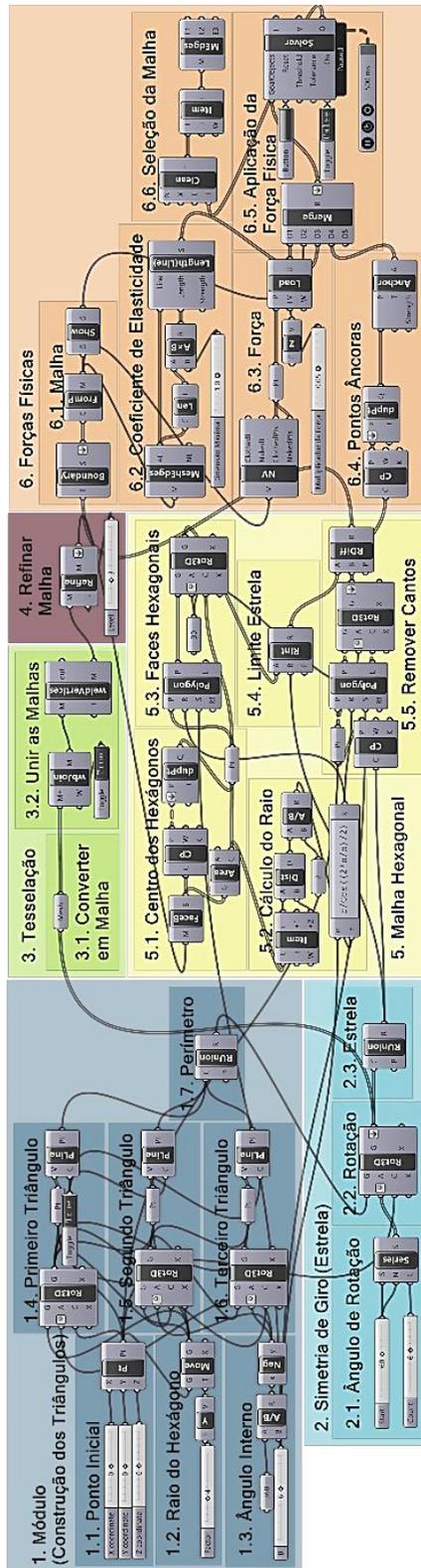


Figura 7.15 Programação visual referente ao primeiro modelo do projeto do Pavilhão Shellstar.
 Fonte: Elaboração própria.

Na etapa 1, se representa o módulo inicial do projeto. Para isso, é definida a posição dos pontos iniciais do projeto (A), é feita a união desses elementos por linhas para formar os triângulos base (B) e, depois, o contorno desse conjunto é definido como o módulo (C). Na etapa 2, define-se a simetria de rotação, em que ocorre a repetição do módulo por meio da rotação em série em torno de um ponto central, totalizando 6 módulos (D). Com a estrela projetada no plano horizontal, parte-se para sua tesselação na etapa 3, transformando a superfície em malha e os triângulos base em faces dessa malha (E). Na etapa seguinte, se estabelece o refinamento dessa malha, com a subdivisão das faces triangulares (G para estrela inteira e H em detalhe) para aumentar a resolução e detalhamento da malha. Na etapa 5, se representam os polígonos duais das faces triangulares. Para isso, são selecionados os vértices (I) e os centros das faces (J) como referência para a construção dos polígonos hexagonais (K) e suas rotações (L), para se estabelecer um padrão regular de preenchimento da superfície. Ainda nessa etapa, se delimita o limite da estrela (M) e também se subtrai os hexágonos nos pontos de controle da estrela (N, O e P). Por fim, na etapa 6, se configura e aplica as forças físicas. Com esse intuito, faz-se necessário reconstruir a malha em faces hexagonais (Q), selecionar os pontos âncora no perímetro da estrela (R) e definir os pontos de aplicação da força como sendo os vértices da malha (S). Ao final do processo, a geometria obtida pode ser vista em Figura 7.16 T.

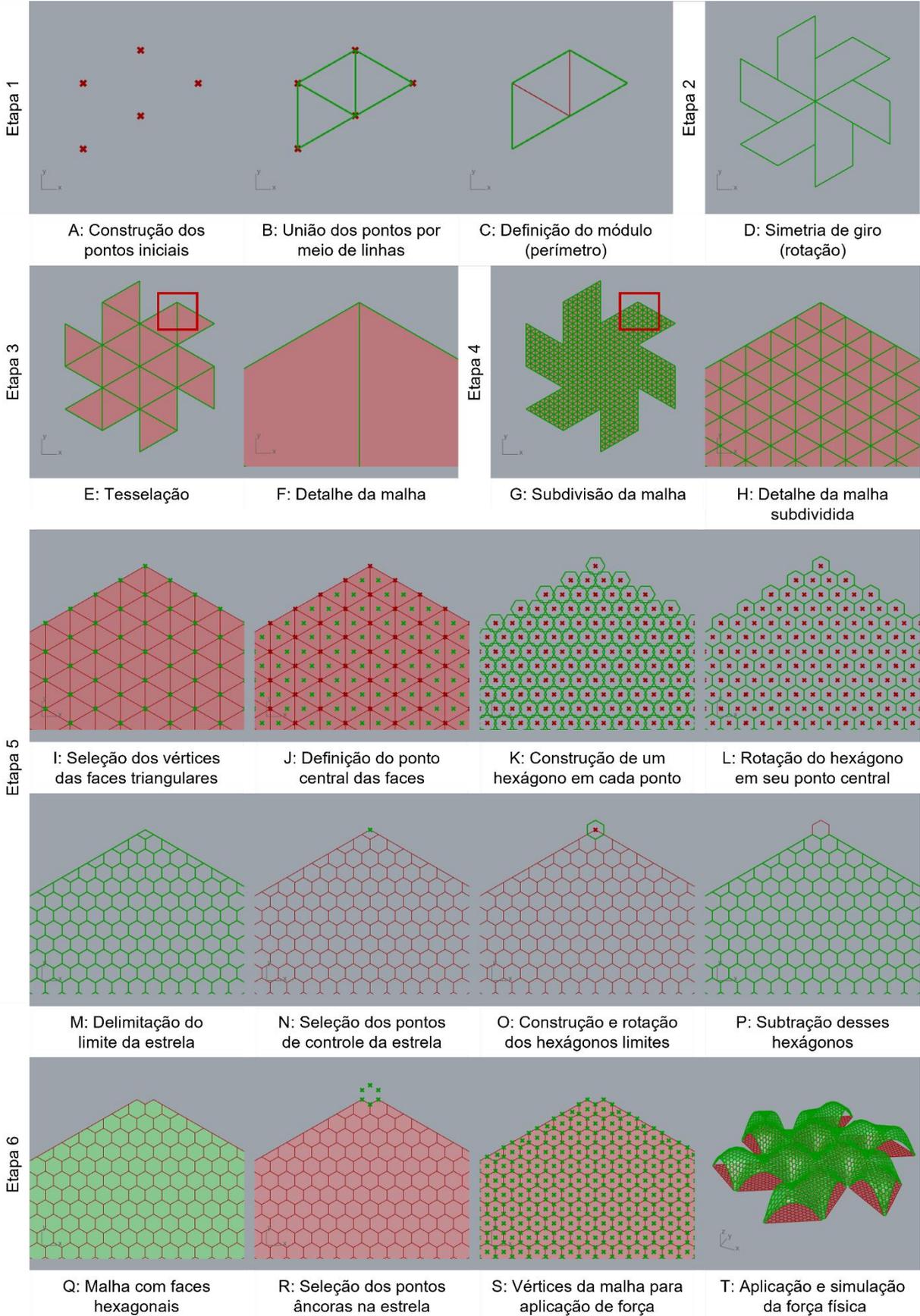


Figura 7.16 Representação da primeira proposta de processo de modelagem do Pavilhão Shellstar.
 Fonte: Elaboração própria.

7.2. Redefinição da estrutura de saber do Pavilhão Shellstar

Em um primeiro momento foi desenvolvida a programação a partir da lógica anteriormente apresentada, focando na obtenção da geometria por meio de um processo físico de geração da forma. Este processo seguiu a adaptação feita por Singla (2019) e Raghu (2019) ao modificar a geometria da composição da malha para um conjunto exclusivamente de polígonos hexagonais, devido à falta de material que explicasse como os arquitetos configuraram a malha hexagonal contendo um polígono central pentagonal. Ao configurar a forma como uma estrela de seis pontas, o polígono central assume a forma de um hexágono, que é compatível tanto com a malha triangular (Figura 7.17 A) quanto com a malha hexagonal totalmente regular em todo o projeto (Figura 7.17 B).

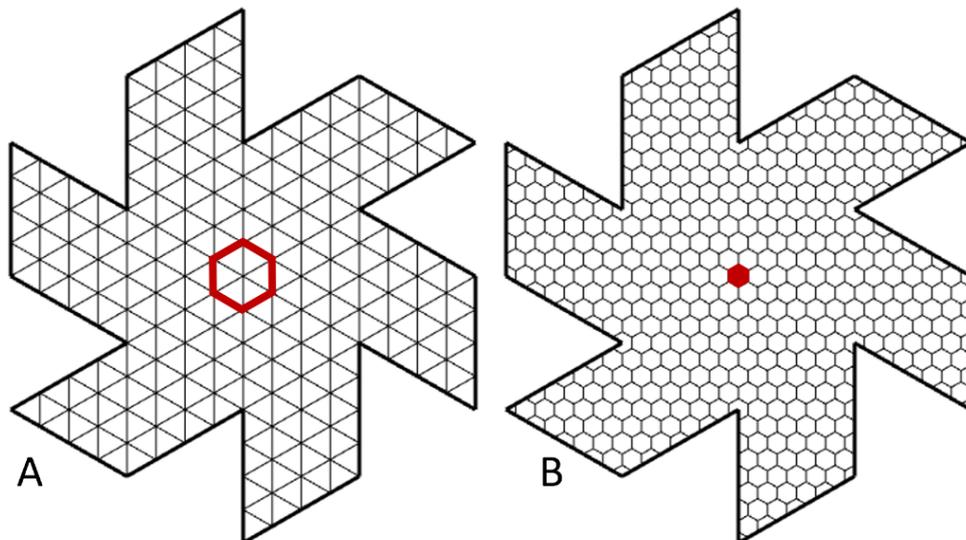


Figura 7.17 Padrão triangular (A) e hexagonal (B) de preenchimento da estrela de seis pontas com o polígono central destacado em vermelho.

Fonte: Elaboração própria.

Ao observar a estrela de cinco pontas do projeto original, é possível notar que o elemento central se encaixa na malha inicial composta por triângulos. Isso ocorre porque esses elementos se adaptam à estrutura da malha, apresentando uma deformação cada vez maior à medida que se aproximam do centro da estrela, conforme ilustrado na Figura 7.18 A. Ou seja, o padrão triangular adotado para a etapa de subdivisão da face não contém somente triângulos equiláteros, pois a origem dos triângulos (faces do módulo) são triângulos isósceles e equiláteros. Nesse sentido, a dificuldade estava no fato de que o padrão desejado para a estrela de cinco pontas era hexagonal, um padrão dual da malha triangular.

Como consequência, uma possível alternativa para alcançar o padrão hexagonal dessa malha seria adotar o processo transformação dos triângulos em seus polígonos duais, que são os hexágonos. Ao utilizar esse processo para configuração dos polígonos que representam a face da malha, há uma deformação dos hexágonos, quanto mais próximos ao centro da estrela (Figura 7.18 B). Essa deformação ocorre, pois, os triângulos que dão origem a eles já apresentavam esse comportamento, embora menos aparente (Figura 7.18 A).

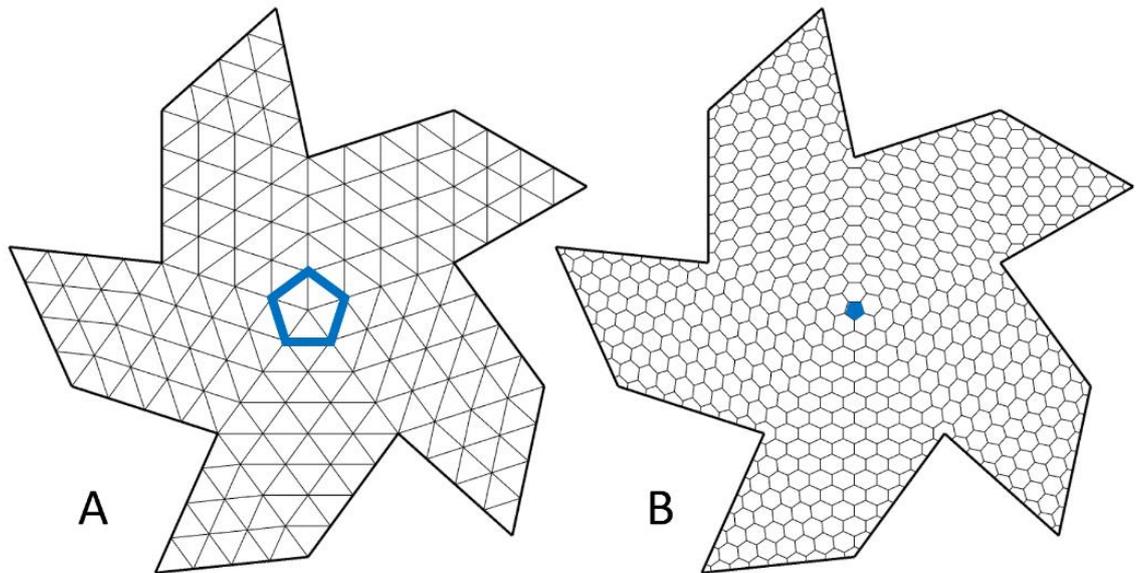


Figura 7.18 Padrão triangular (A) e hexagonal (B) de preenchimento da estrela de cinco pontas com o polígono central destacado em azul.

Fonte: Elaboração própria.

Essa solução proporcionou uma aproximação do padrão desejado, avançando no processo de modelagem. Porém, quando se transforma os polígonos pela dualidade, o padrão hexagonal apresenta uma estrutura diferente daquela desenvolvida por Matsys. Isso resulta em elementos (faces) rotados em relação à disposição original, conforme pode ser observado nas imagens da Figura 7.19.

No padrão hexagonal dos polígonos duais, representado na Figura 7.19 A, as faces da malha localizadas nas extremidades (cantos) possuem um maior número de arestas em comparação com o padrão proposto por Matsys, conforme Figura 7.19 B. Essa diferença é evidenciada no encontro das pontas da estrela, onde há uma aresta a menos entre os padrões (círculo verde na Figura 7.19). Na Figura 7.19, os elementos que se equivalem são destacados com a mesma cor nas imagens A e B, permitindo visualizar as diferenças nas organizações do padrão hexagonal.

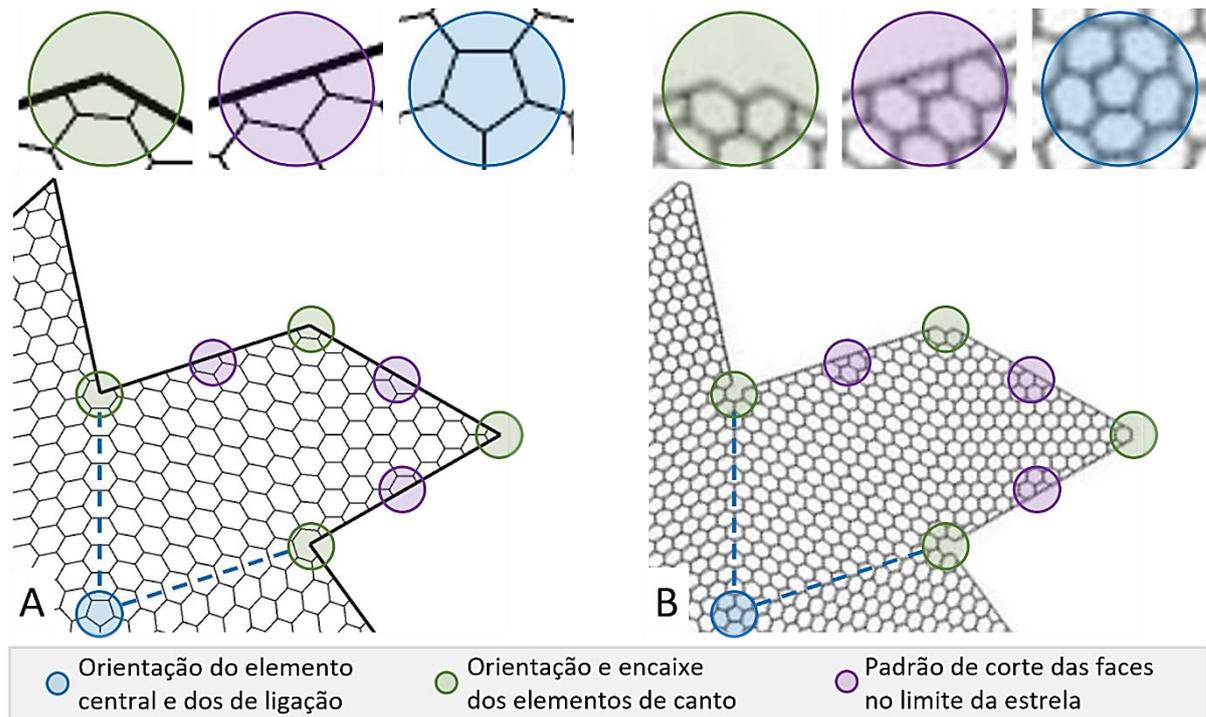


Figura 7.19 Comparativo das faces hexagonais das estrelas de cinco pontas geradas a partir de polígonos duais (A) e da padronização apresentada por Matsys (B).

Fonte: Elaboração própria (A) e modificado a partir de Matsys (c2022) (B).

No decorrer da pesquisa, identificou-se que o arquiteto responsável pelo projeto do Pavilhão Shellstar utiliza com recorrência a geometria do padrão de Voronoi para desenvolver outros projetos. De acordo com Nowak (2015), projetos emergentes como o Honeycomb Morphologies e Chrysalis III, ambos de autoria do escritório Matsys, abordam esse padrão como uma organização algoritmizada que busca o equilíbrio estrutural e superficial. Com base no reconhecimento de que a estrutura de saber de um dos projetos de Matsys emprega o padrão Voronoi e do interesse do escritório no estudo deste padrão, lançou-se a hipótese de que o encaixe das faces da malha pudesse ser resolvido utilizando-se essa organização irregular do espaço. Esta hipótese acrescenta uma maior complexidade para a estrutura de saber a ser construída.

Na Figura 7.20, é apresentada uma comparação entre o módulo desenvolvido a partir do Voronoi (Figura 7.20 A) e o proposto por Matsys (c2022) (Figura 7.20 B). Apesar da diferença de escala dos polígonos da malha, a nova divisão da superfície em padrão hexagonal é equivalente à proposta do escritório. Esta nova configuração foi possível de obter a partir do emprego da modelagem paramétrica com o plugin *Grasshopper*, que incorpora tal padrão como uma técnica de representação.

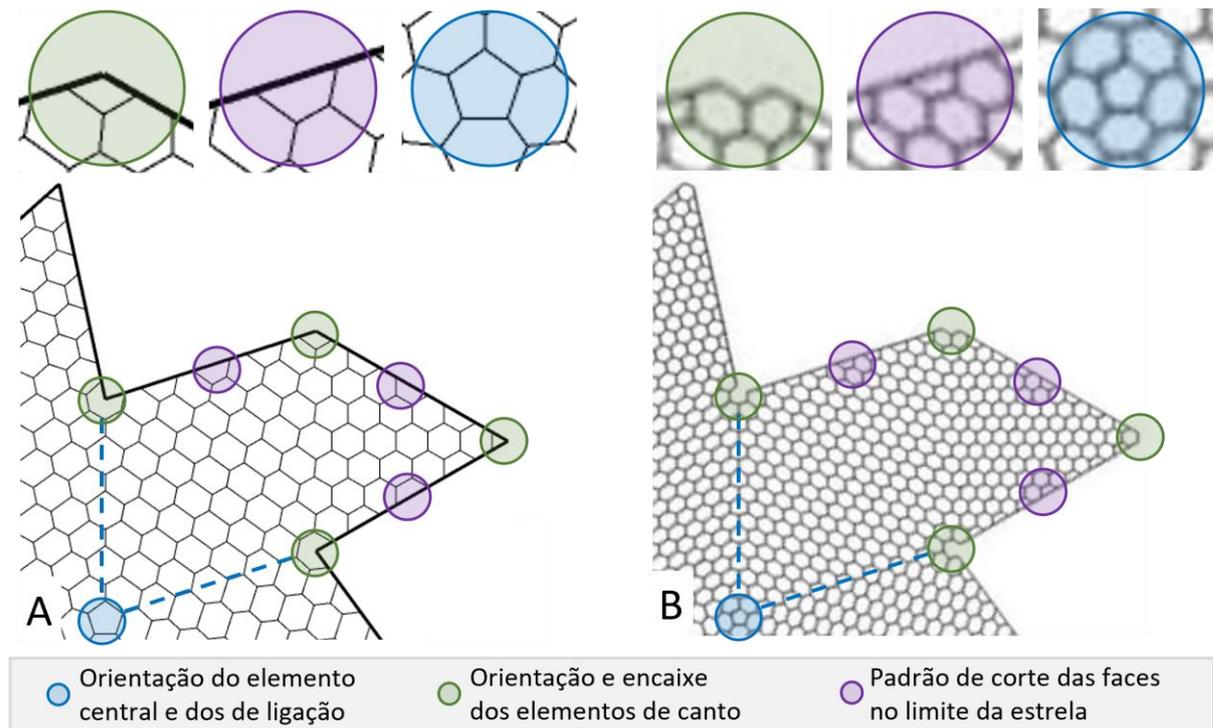
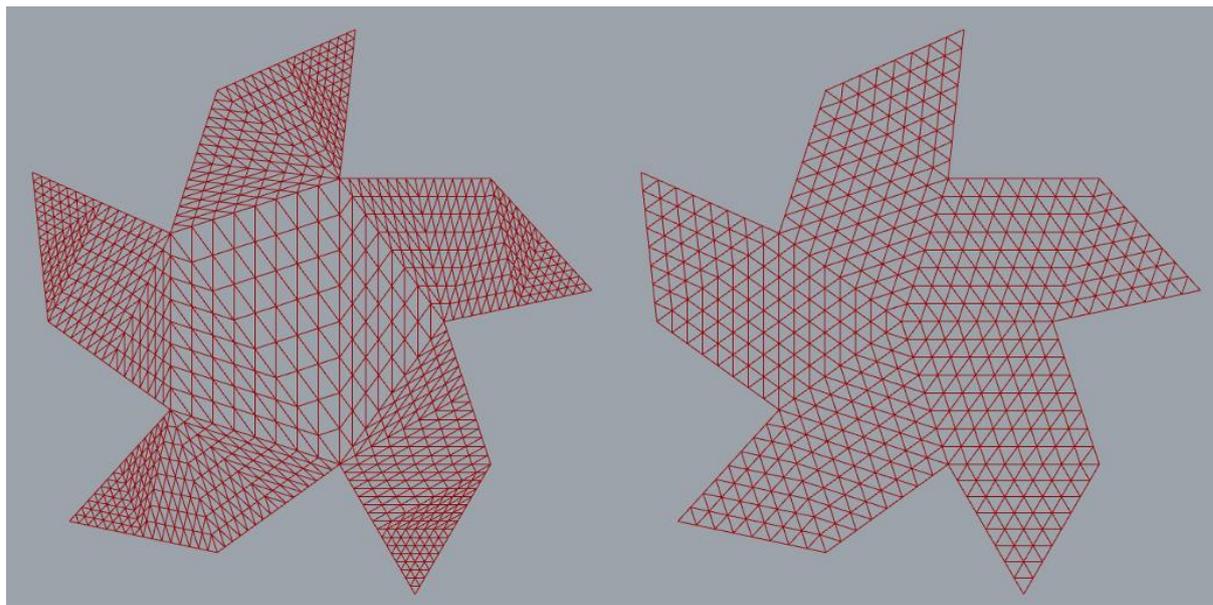


Figura 7.20 Comparativo das faces hexagonais das estrelas de cinco pontas geradas a partir do diagrama de Voronoi (A) e da padronização apresentada por Matsys (B).

Fonte: Elaboração própria (A) e modificado a partir de Matsys (c2022) (B).

Então, embora Matsys (c2022) não tenha mencionado explicitamente a presença do padrão de Voronoi durante o processo de projeto do pavilhão Shellstar, a nova organização espacial viabiliza conceitos iniciais do projeto. Isso porque as células hexagonais na estrela de cinco pontas não são uniformes, o que o Voronoi resolve devido a ser um padrão de subdivisão irregular da superfície. Essa alteração no processo permitiu retomar a referência inicial da flor da orquídea de Hong Kong e simplificar a geração das faces da malha.

No entanto, para a redefinição do processo de modelagem, foi necessário fazer alterações na ordem de representação da geometria. No primeiro processo, a estrela de seis pontas apresentava uma triangulação que cobria a superfície de maneira regular, o que permitia criá-la por intermédio da repetição do módulo por rotação em série. Em seguida, a tesselação e a subdivisão eram aplicadas. Ao lidar com a estrela de cinco pontas, essa sequência não pôde ser replicada devido ao fato de que os triângulos resultantes da subdivisão (faces da malha) não eram mais idênticos, como foi visto anteriormente na Figura 7.18. Assim, não se obtinha a regularidade da divisão triangular da estrela, conforme ilustrado na Figura 7.21 A.



A: Construção dos triângulos na sequência antiga (Rotação, união, tesselação e refinamento)

B: Construção dos triângulos na sequência nova (Tesselação, refinamento, rotação e união)

Figura 7.21 Comparação das malhas subdivididas a partir de duas sequências de modelagem.
Fonte: Elaboração própria.

Para solucionar esse problema e garantir um padrão triangular regular no conjunto das cinco pontas da estrela, as etapas de tesselação e subdivisão foram aplicadas primeiramente no módulo, que corresponde a uma das pontas da estrela. Somente após essas etapas serem concluídas no módulo que ele passou a ser rotado e repetido, para formar a estrela de cinco pontas, ilustrada na Figura 7.21 B.

Na Figura 7.21 está disposta a geometria das duas estrelas de cinco pontas construídas como malhas, mas que para simplificação estão com visualização apenas de suas arestas. No primeiro caso, a estrela baseada na sequência anterior (A) apresenta triângulos com deformações e com demasiada diferença de escala entre eles, enquanto que com a nova ordem das etapas (B), apesar dos triângulos não serem idênticos, estes apresentam uma regularidade principalmente quanto à escala dos triângulos, situados em todo o padrão.

Dessa forma, entende-se que há uma redefinição da estrutura de saber anterior, a qual envolve o processo de projeto da Shellstar. A nova estrutura, conforme Figura 7.22, considera não só o discurso e representações oficiais do escritório, mas também adiciona as técnicas envolvidas na representação da geometria. Na figura, as expressões assinaladas com letra vermelha constituem-se em elementos de saber reestruturados ou ampliados em relação à estrutura anteriormente apresentada.

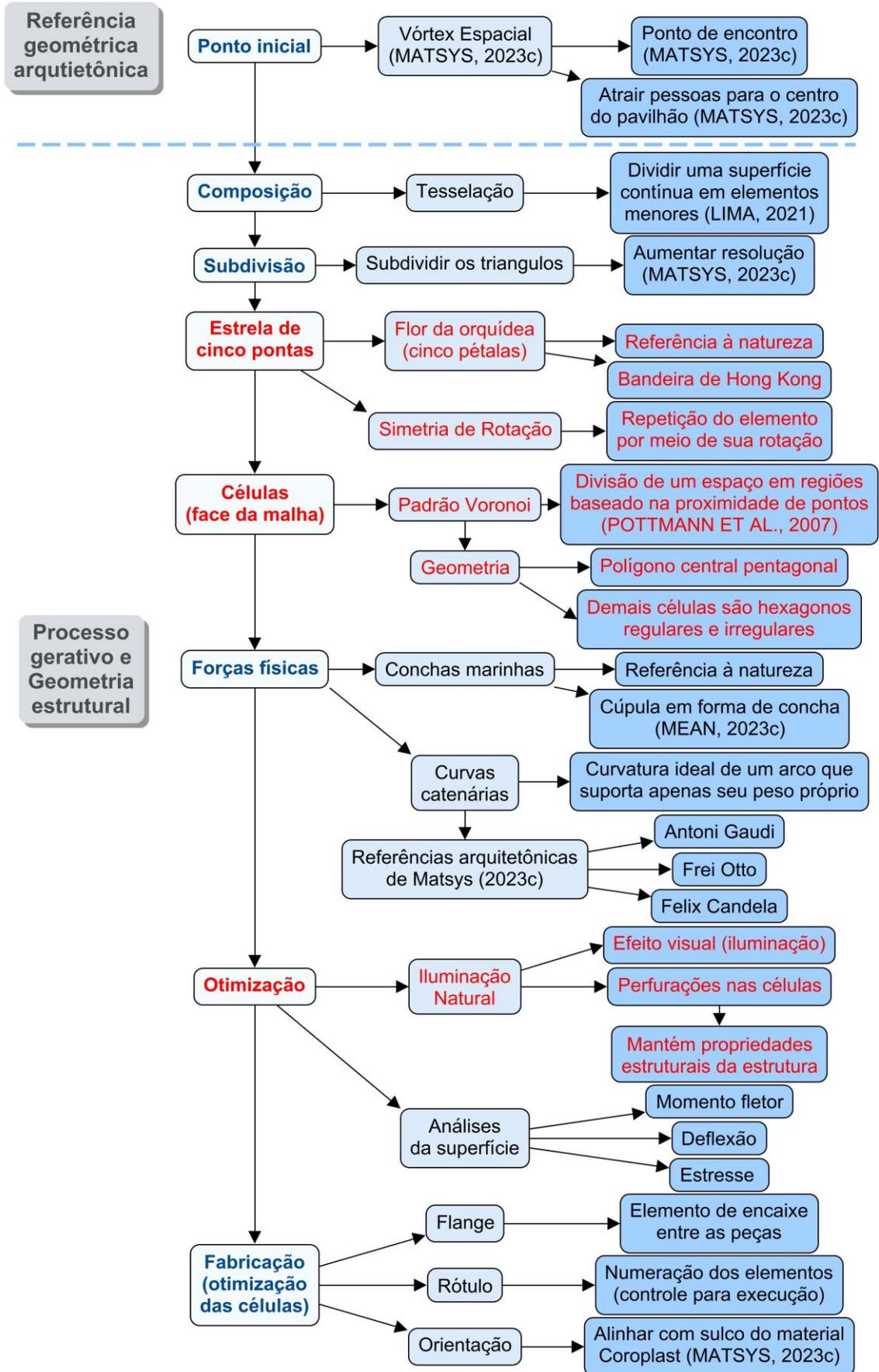


Figura 7.22 Redefinição do esquema teórico do Pavilhão Shellstar.
 Fonte: Elaboração própria.

Além disso, a estrutura de saber que foi explicitada durante o desenvolvimento das demais obras também está presente na estrutura de saber do Pavilhão Shellstar. Isso porque as questões de iluminação natural não foram abordadas no primeiro lançamento por envolverem lógicas mais complexas e que exigiam uma maior compreensão das malhas. O avanço na pesquisa passa a viabilizar a modelagem das perfurações nas células, garantindo que se mantenha a estrutura geométrica de uma malha. Com isso, parte-se para um novo esquema síntese do processo de projeto da Shellstar, apresentado na Figura 7.23.

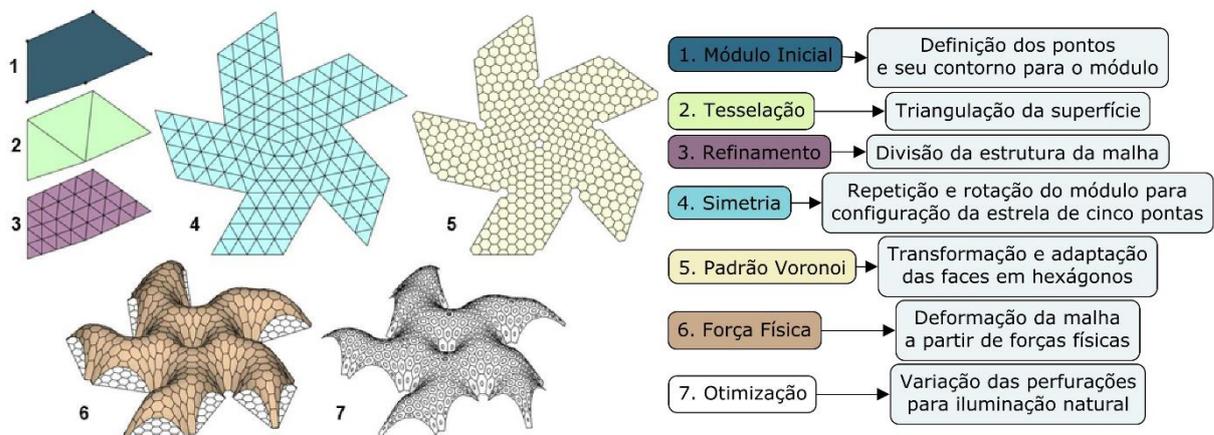


Figura 7.23 Redefinição do esquema síntese do algoritmo e suas etapas para a geração da forma da Shellstar.

Fonte: Elaboração própria.

Assim são reestabelecidas as etapas que caracterizam o segundo processo de modelagem do Pavilhão Shellstar: 1) definição de uma figura inicial composta por uma sequência de pontos (módulo básico); 2) a tesselação da superfície, ou seja, transformação da superfície em malha; 3) o processo de refinamento, em que cada uma das faces triangulares é subdividida para aumentar a resolução e precisão; 4) a configuração da estrela de cinco pontas a partir da aplicação de simetria de rotação em série; 5) a transformação da malha resultante em sua malha dual; 6) aplicação de forças físicas como principal processo de geração da forma tridimensional, utilizando técnicas disponíveis no plugin *Kangaroo* para simular o comportamento estrutural e a deformação sob essas forças visando buscar a forma final do projeto. 7) e os processos de otimização, que nesse caso é abordada a iluminação natural através da variação do tamanho das perfurações das peças.

Com base nesse esquema síntese e suas etapas (Figura 7.23), avança-se para o processo de modelagem do Pavilhão Shellstar por meio da programação

visual, revisada e apresentada na Figura 7.24. No Apêndice E estão detalhadas e ilustradas cada uma das etapas da programação.

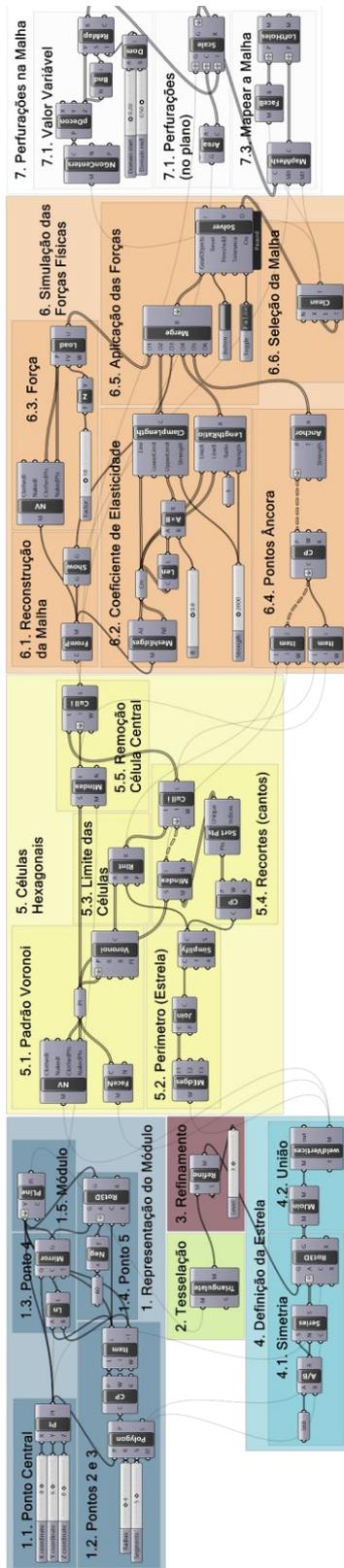


Figura 7.24 Programação visual revisada para o modelo da Shellstar.
 Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 7.25, podem-se observar as imagens que representam as primeiras etapas desse processo de modelagem. Nesse momento são apresentadas a construção do módulo (etapa 1), tesselação (etapa 2), refinamento (etapa 3) e a definição da estrela (etapa 4).

A etapa 1 tem início na modelagem do ponto inicial (A), que será a base para a construção do pentágono central da composição (B e C). Em seguida, ocorre a extração de dois vértices desse polígono, resultando nos pontos 2 e 3 (D). Essa sequência de pontos estabelece as diretrizes iniciais do projeto. A linha definida a partir desses pontos (E) configura o eixo de espelhamento a seguir, para que se obtenha o ponto 4 (F) por meio do processo de reflexão do ponto central do pentágono. Depois, é efetuada uma rotação deste ponto 4 em 60 graus, tendo como centro o ponto 3, obtendo-se assim o ponto 5 (G). Essa sequência de ações forma a base do módulo, que é obtido ao conectar todos esses pontos com uma polilinha (H).

Na segunda etapa, conhecida como tesselação, busca-se estabelecer a malha utilizada no projeto – ou parte dela. Esse procedimento é ilustrado na Figura 7.25 I. Em seguida, na etapa 3, ocorre o refinamento da malha (J), que visa subdividir suas faces para otimizar – em outras etapas – a geometria do projeto. Por fim, realiza-se a rotação em série do módulo subdividido (K), resultando na formação de uma estrela de cinco pontas (L).

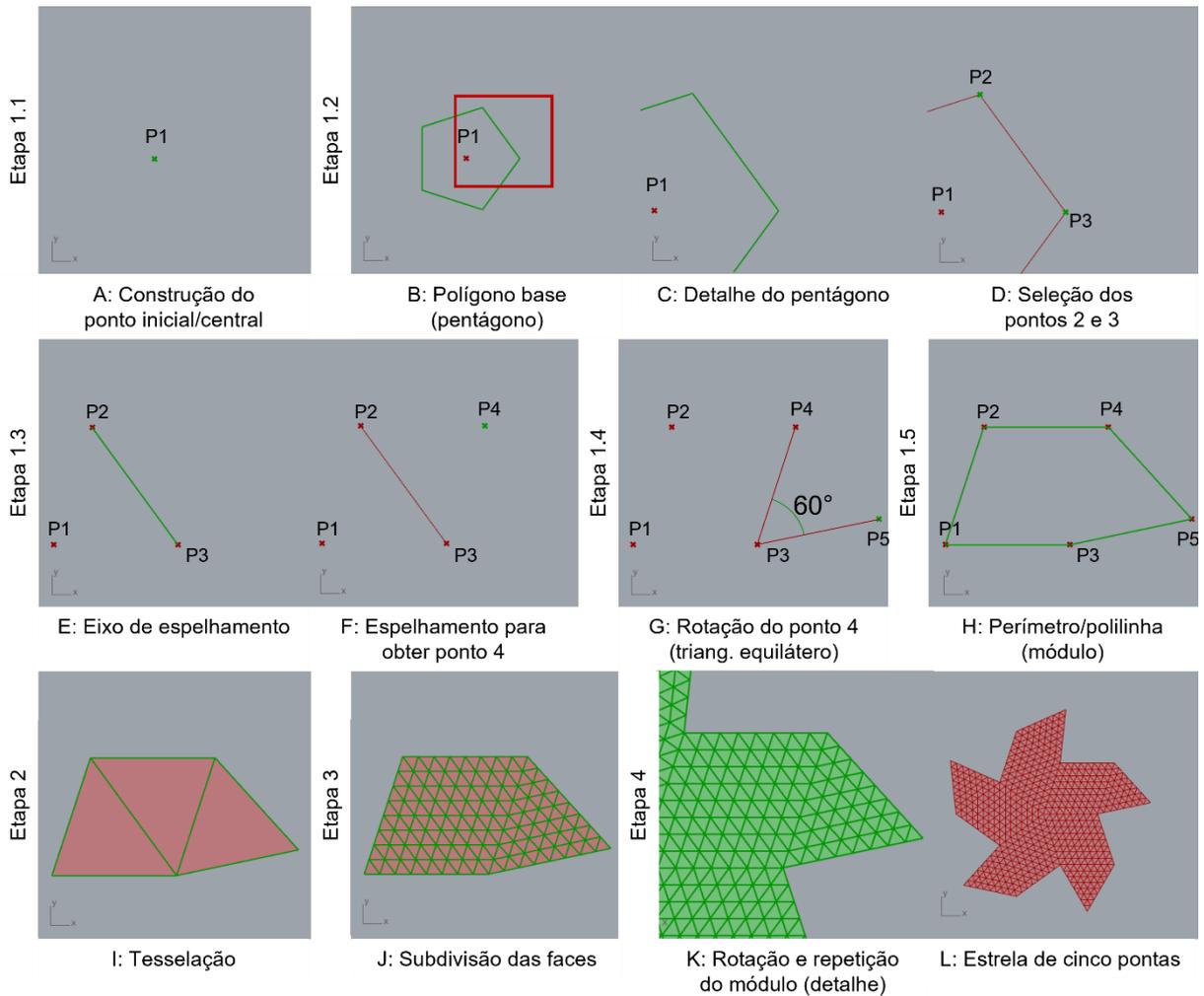


Figura 7.25 Representação gráfica das etapas 1, 2, 3 e 4 do modelo da Shellstar.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 7.26, são apresentadas as imagens correspondentes à etapa 5 do processo de modelagem da geometria tridimensional do Pavilhão Shellstar. Inicialmente, a malha triangular é transformada em malha hexagonal. A partir da malha subdividida em toda a estrela, são extraídos os vértices a malha (A) e os centros das suas faces (B). Esses pontos são utilizados para a construção do padrão de Voronoi (C e D). Em seguida, são selecionadas as arestas do perímetro desse padrão (E), que são unidas (F) a fim de simplificar a curva final (G). Essa simplificação envolve a redução no número de pontos de controle e segmentos da curva, necessária para etapas posteriores em que tais pontos serão utilizados como âncoras no processo de aplicação das forças físicas. Depois, essa curva simplificada intersecciona a geometria do padrão de Voronoi (H), para remover partes das células que estão além do limite da estrela.

Seguindo a abordagem de Matsys (c2022), um passo importante na transformação das malhas é a remoção das células localizadas nos cantos da estrela, uma vez que esses elementos correspondem aos pontos de fixação da malha. Para determinar essa remoção de elementos específicos, é necessário seguir um conjunto de procedimentos. Primeiro, selecionam-se os cantos da estrela (I), ou seja, seus pontos de controle depois da curva ser simplificada. Identificam-se as células equivalentes (J), por serem criadas a partir dos pontos de controle, compartilham o mesmo índice na lista de elementos. Assim, removem-se as células da extremidade da estrela da lista de células (K). Esse processo é repetido para identificar também o ponto central da estrela e remover sua célula equivalente (L). Dessa forma, ao final da etapa, obtêm-se os polígonos que representam as faces da malha no plano XY.

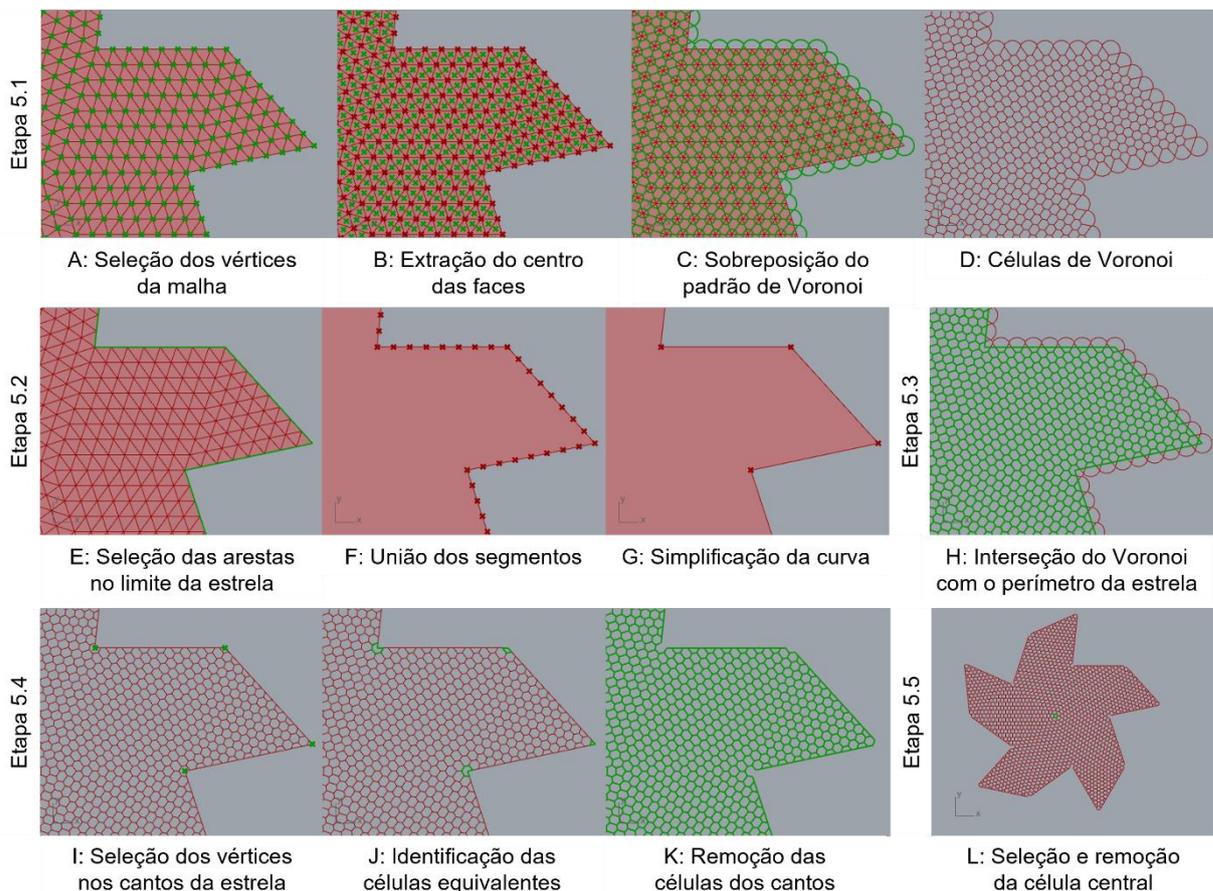


Figura 7.26 Representação gráfica da etapa 5 do modelo da Shellstar.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 7.27, pode-se visualizar as imagens referentes às etapas 6 e 7 do processo de modelagem, seguindo a abordagem da programação visual já apresentada. Essas etapas envolvem a “preparação” dos elementos para a

simulação, seguindo o método descrito por Mariano e Pires (2021) em seu estudo sobre a Estação de Central de Stuttgart. Os autores separaram a malha em diferentes elementos - malha, vértices e arestas - para configuração e utilização do componente de forças físicas, conhecido como *Kangaroo*. Nesse contexto, a malha é a superfície, ou seja, o conjunto de faces que cobrem a região; os vértices são os pontos de aplicação da força, podendo esta ser variável ou constante na extensão da malha; e as arestas os elementos que controlam a deformação da geometria, permitindo uma maior ou menor deformação.

Em um primeiro momento, a malha é reconstruída (A), visando adequá-la para a simulação. Em seguida, são extraídas suas arestas (B), considerando também as arestas internas das faces NGon - que correspondem à triangulação das faces hexagonais - uma vez que essas arestas são responsáveis pelo controle da deformação da malha durante a simulação. Paralelamente, são extraídos os vértices da malha (C), pois serão os pontos de aplicação das forças físicas durante o processo.

Como mencionado anteriormente, as células localizadas nos cantos da estrela são removidas para fixação da malha/projeto. Portanto, é necessário selecionar esses elementos (D) e obter os pontos de controle (E). Esses pontos serão utilizados como âncoras, fixando a malha durante a simulação. Com esses elementos (arestas e sua deformação; vértices e força física) preparados, é possível prosseguir para o processo de simulação (F), aplicando as forças desejadas e observando a resposta da malha às mesmas.

Nesse momento, com a estrutura em concha do pavilhão já formada, passa-se para o processo de perfuração das células visando obter um melhor aproveitamento da iluminação natural (etapa 7). São extraídos os centros das células hexagonais depois da simulação (G), bem como seus equivalentes antes da simulação (H). Isso é feito para mapear o escalonamento (I), que tem como fator de multiplicação a altura de cada célula. Em seguida, realiza-se um mapeamento entre as duas malhas (antes e depois da simulação) para determinar a geometria das perfurações aplicada na malha resultante das forças físicas (J). Por fim, são selecionados os polígonos correspondentes a cada face da malha simulada e os polígonos correspondentes às perfurações, para construir uma nova malha com base nesses elementos (K e L).

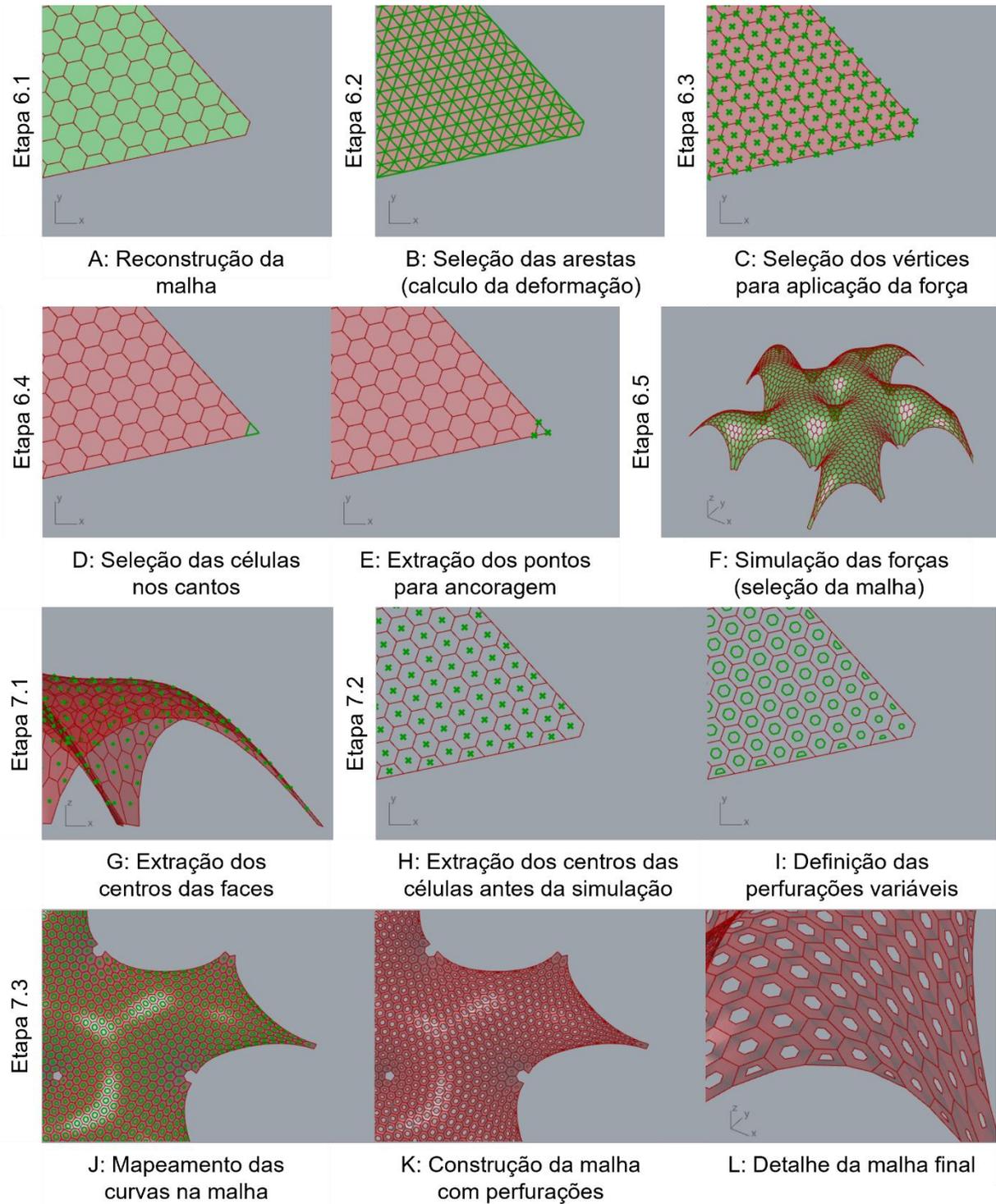


Figura 7.27 Representação gráfica das etapas 6 e 7 do modelo da Shellstar.

Fonte: Elaboração própria.

Ao final do processo de programação, a geometria obtida com essa modelagem pode ser vista na Figura 7.28.

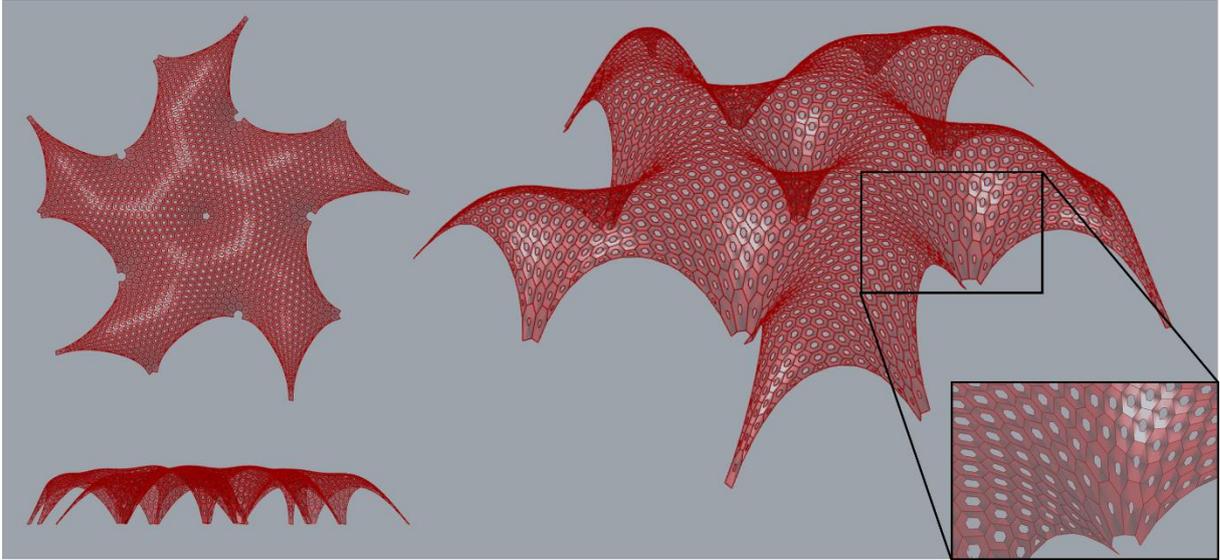


Figura 7.28 Vistas superior, frontal, perspectiva e detalhe do modelo final Pavilhão Shellstar.
Fonte: Elaboração própria.

7.3. Revisão das classificações quanto ao tipo de face e função da malha no Pavilhão Shellstar

A partir dos conceitos analisados e da modelagem proposta, retoma-se a classificação do projeto quanto à geometria da face e à aplicação da malha. Nesse sentido, é feita uma comparação entre os itens encontrados durante a revisão de literatura e os identificados durante a explicitação da estrutura de saber. Na Tabela 7.1 está apresentada a comparação referente à classificação da geometria das faces da malha para o Pavilhão Shellstar.

Tabela 7.1 Classificação da Shellstar quanto à geometria das faces da malha.

Geometria das Faces na Shellstar			
		Inicial	Pós Est. do Saber
Regular	Triângulo		
	Retângulo		
	Hexágono		
Semi Regular			
Irregular	Diag. de Voronoi		
	Triang. de Delauney		

Fonte: elaboração própria.

Nesse projeto se encontra a maior diferença entre a classificação inicial e aquela resultante da estrutura de saber. Em um primeiro momento, a classificação da geometria das faces da malha como hexagonal era condizente com o discurso dos responsáveis, que definiam que a malha era majoritariamente hexagonal. Porém, em sua estrutura de saber, identificou-se e explicitou-se que o padrão

hexagonal apresentado pode ser desenvolvido a partir da divisão da superfície da estrela. Ou seja, por meio do diagrama de Voronoi. Nesse sentido, a nova classificação está mais condizente com a malha apresentada, pois suas faces são irregulares. Então, na Tabela 7.1, está destacada em verde a atual classificação da geometria das faces da malha.

Para a análise de função das malhas junto ao projeto do Pavilhão Shellstar (Tabela 7.2) foram confirmados os usos citados na etapa de revisão e também foi identificada uma nova justificativa para empregar malhas no processo dessa obra. Dessa maneira, confirmou-se os usos computacional, otimização estrutural e geração de forma, acrescentando também a função de otimização da forma.

Tabela 7.2 Função da malha na Shellstar.

Função das Malhas na Shellstar		
	Inicial	Pós Est. do Saber
Representação Digital		
Computacional		
Tesselação		
Otimização da Forma		
Otimização Estrutural		
Geração da Forma		

Fonte: elaboração própria.

Primeiro, analisa-se o uso quanto à função computacional, aquela cuja apropriação da malha ocorre a partir do sistema organizacional que dá origem à sua geometria. O modelo matemático computacional que define a malha opera com o gerenciamento da numeração e sequência dos elementos de maneira automática de acordo com uma lógica interna. Quando se aborda essa função em um projeto, os responsáveis se beneficiam desse mapeamento para uma organização durante a fabricação e a montagem do projeto. Nesse sentido, é descrito no processo de projeto da Shellstar que seus elementos (faces) são numerados para estabelecer uma sequência e lógica construtiva.

A otimização estrutural é uma função da malha já identificada anteriormente para o caso da Shellstar. Isso porque o uso das malhas como meio para análises estruturais está presente desde o discurso inicial dos responsáveis pelo projeto. As etapas que envolvem a otimização da forma são explicitadas e ilustradas de maneira

oficial em imagens e vídeos de referência no site da empresa responsável, abordando questões como o momento fletor, deflexão e estresse da estrutura/elementos. Dessa forma, confirma-se a estrutura inicial que definia esse uso das malhas junto ao projeto da Shellstar.

Depois se analisa o uso da malha na geração da forma do projeto. Enquanto nos demais projetos existe uma geometria que passa a ser transformada em malha durante o processo, a Shellstar é caracterizada por um processo que tem a malha desde o início da sua concepção. Isso porque a referência arquitetônica adotada, Gaudí e suas cordas suspensas, são o processo analógico de manipulação das malhas. Então, quando se gera a forma por meio de simulação da forma física, só é possível obter tal resultado a partir do uso das malhas.

Por fim, a otimização da forma é utilizada como maneira de resolver e suavizar superfícies não convencionais. Nesse sentido, o uso da malha para tal função está numa etapa anterior àquela em que é percebida. Ou seja, embora ocorra nas etapas iniciais da programação, sua suavidade só estará – visualmente – explícita depois da simulação das forças físicas, uma das últimas etapas do processo. Nesta etapa, a suavização da superfície ocorre quando há a deformação por atuação das forças, resultando em uma curvatura que se aproxima da obtida por Gaudí com o emprego das curvas catenárias. Então, mesmo a otimização ocorrendo em um momento anterior, é a etapa de subdivisão das faces a responsável pela otimização da forma na Shellstar.

7.4. Análise e discussão de resultados

A análise do projeto Shellstar tem origem na disciplina Análise e Representação de Superfícies Complexas da Arquitetura Contemporânea, cursada no ano de 2020, conforme anteriormente descrito. Por ser uma disciplina de um semestre, a primeira estrutura de saber identificada não apresentava o mesmo aprofundamento que está sendo tratado nesta dissertação. Nesse sentido, embora seja um projeto de uso temporário (arquitetura efêmera) e a seção de informações do projeto é menor que as demais, ele tem sua relevância para a pesquisa.

Destaca-se a importância de essa obra integrar o corpo de análise da dissertação, pois deu origem a ela ao despertar o interesse e motivar o estudo de malhas na arquitetura. Também por abordar a geração da forma por simulação de

forças físicas em malhas. A estrutura da Shellstar agrupa conceitos geométricos de todas as obras: o processo de projeto se utiliza de polígonos triangulares (elemento principal da malha na Biosfera de Montreal), hexagonais (utilizados nas duas camadas do Projeto Éden) e o padrão Voronoi (destacado na fachada do Water Cube). Além de avançar para a aplicação de forças físicas (otimização).

A conexão da Shellstar com as demais obras é a menos aparente quando observado apenas o modelo geométrico, mas é aquela que está mais interligada aos conceitos geométricos compartilhados entre elas. Após a primeira tentativa de explicitação da estrutura de saber da Shellstar, foi possível identificar sua possível correlação ao conceito geométrico compartilhado entre as primeiras obras: o uso de malhas hexagonais a partir de polígonos duais. Embora essa alternativa não resulte na geometria final mais próxima da modelagem original de Matsys, fez parte do processo de desenvolvimento da estrutura de saber da Shellstar.

Ou seja, identificou-se uma relação da estrutura de saber do Pavilhão Shellstar com a estrutura da Biosfera de Montreal e do Projeto Éden. Porém, somente após a identificação da estrutura do Water Cube que foi possível estabelecer uma correlação entre os conceitos dos projetos. O padrão de divisão de superfície, presente na fachada do centro aquático, é um elemento em comum entre as estruturas de saber. Nesse sentido, ocorre uma relação entre os projetos mesmo que um processo não faça referência ao outro. Enquanto que no Water Cube o Voronoi é um resultado do processo (o projeto tem como resultado o padrão em sua fachada), na Shellstar esse padrão é uma etapa importante adotada durante o desenvolvimento da forma, mesmo que não fique aparente na geometria final.

Essa descoberta destaca a importância de explorar e revisitar as estruturas de saber ao longo do processo de pesquisa. Mesmo quando a conexão entre os projetos não é evidente à primeira vista, é fundamental considerar como os conceitos geométricos compartilhados podem influenciar e enriquecer o desenvolvimento de cada obra. Através desse olhar interconectado, é possível identificar novas perspectivas e abordagens que ampliam a compreensão dos princípios geométricos na arquitetura contemporânea. Essa constatação ressalta a importância de abordar a pesquisa de forma holística, buscando entender não apenas as estruturas individuais de cada obra, mas também as relações e interações entre elas.

O projeto da Shellstar unifica a abordagem da busca de formas com a geometria subjacente a ela, demonstrando que não basta apenas saber tecnicamente como obter uma forma, mas conhecer a geometria que a possibilita - neste caso o padrão de preenchimento do plano. Autores como Burry e Burry (2010) abordam saberes básicos de geometria na arquitetura contemporânea, como a tesselação/tiling (preenchimento de superfícies planas) e o packing (preenchimento do espaço), que se equivalem ao saber aqui explicitado. Isto caracteriza uma recorrência da transposição do saber geométrico/científico para o contexto profissional, por arquitetos que buscam neste saber ir além da representação, para efetivamente recorrerem a tal geometria como elemento de arquitetura.

A transposição para o contexto educativo passa a considerar então a estrutura integral de este saber, a qual pode ser explicitada a partir do estudo, análise e representação de casos referenciais de arquitetura. A modelagem paramétrica tem um papel relevante neste processo, pois ela exige o reconhecimento de um conjunto de técnicas associadas ao saber geométrico e arquitetônico do projeto. Enquanto nas primeiras obras analisadas a modelagem está validando o referencial teórico (discurso), para a Shellstar a maior importância está na própria modelagem, por valorizar e destacar uma das etapas do processo de construção da estrutura de saber.

Foi necessário aliar a técnica – processo de projeto - com a geometria – subdivisão da superfície - para compreender as etapas citadas por Matsys. Apesar da transposição desse saber estar oculta no discurso dos responsáveis, existiu transformação do saber científico para o profissional. Porém, o que esta pesquisa se propõe é continuar a transposição para o contexto educacional, permitindo que novos estudantes de arquitetura se apropriem desse saber tão presente em projetos recentes. Para isso, alia-se discurso, representação, análise, modelagem, parametria e geometria a fim de obter um saber integral, nos termos da teoria antropológica da didática, para que os estudantes compreendam o processo de projeto por trás da arquitetura contemporânea recente que adotam geometrias complexas. Isto para que os estudantes visualizem não apenas a forma como algo diferenciado e único, mas que responde a um ou mais requisitos específicos, como o desempenho estrutural, possibilitado pelo emprego de tecnologias avançadas e técnicas de design criativas para gerar uma estrutura diferenciada e responsiva.

Capítulo 8

Conclusão

8. Conclusão

No decorrer da pesquisa, buscou-se reconhecer e explicitar a estrutura de saber relativa à aplicação de malhas em projetos de arquitetura, sob os pressupostos da Teoria Antropológica da Didática, de Chevallard (1999). Foram analisadas e representadas as geometrias de quatro projetos, a fim de explicitar sua estrutura para além do discurso dos arquitetos responsáveis. O objetivo foi de reconhecer conceitos de projeto que permeiam a geometria e suas relações com questões bioclimáticas, sustentáveis, estruturais e outras pertinentes à arquitetura.

A estrutura de saber em todos os projetos estudados e representados resulta de uma construção multidisciplinar, apesar de ter sua origem na geometria/matemática. Seu desenvolvimento e estruturação se deram a partir da sistematização dos discursos dos arquitetos de cada projeto, mas também incluindo materiais de outros pesquisadores para complementar e explicitar os elementos de saber que compõem essa estrutura. Nesse sentido, a própria modelagem é um exercício que traduz concretamente estes elementos da estrutura de saber de um projeto, reforçando e esclarecendo o que o pesquisador reconheceu na revisão de literatura.

No que diz respeito aos projetos examinados neste estudo, foi possível identificar o saber geométrico e da representação da geometria complexa, que constituem o próprio processo de projeto das obras. Os elementos que formam tal estrutura de saber estão correlacionados sequencialmente, servindo como referência arquitetônica. Isso implica que há uma construção gradual do saber, partindo da Biosfera de Montreal (uma única geodésica) até chegar ao Projeto Éden, que utiliza de uma composição de geodésicas com escalas distintas e intersecções para representar um agrupamento de bolhas de sabão. Em seguida, tem-se o caso do Water Cube, que aborda um modelo mais complexo de bolhas, por meio da repetição (transformações geométricas) de um conjunto de bolhas que são configuradas no modelo Weaire-Phelan.

Enquanto esses projetos buscam referências arquitetônicas mais próximas de suas épocas, o Pavilhão Shellstar baseia-se em projetos mais antigos, como os processos de geração da forma por atuação de forças físicas adotado por Antoni Gaudí e Frei Otto, ambos no século XX. Apesar de a primeira modelagem paramétrica desse projeto ter sido realizada anteriormente ao desenvolvimento

desta pesquisa, foi apenas após explicitar a estrutura de saber da Biosfera de Montreal, do Projeto Éden e do Water Cube que foi possível reconhecer uma maneira de se aproximar da geometria original e compreender questões não explícitas no discurso dos arquitetos do projeto. Portanto, a explicitação e sistematização da estrutura de saber ocorreram de maneira progressiva, contribuindo para a constituição de uma estrutura integral de saber.

As obras analisadas abrangem as etapas de projeto, análise, simulação, fabricação e montagem. Em alguns casos, certas etapas são mais enfatizadas pelos arquitetos em seus discursos, mas por meio do exercício de modelagem paramétrica (e sua explicitação da lógica construtiva) é possível demonstrar a integração do projeto, suas relações e as consequências de cada etapa. Nesse sentido, mesmo quando a programação visual apresenta poucos parâmetros variáveis, a abordagem paramétrica destaca as conexões entre os elementos dos projetos. Assim, quando um único parâmetro é alterado, toda a sequência de etapas subsequentes é reorganizada para se adaptar aos novos valores. No entanto, as modificações em si não são o principal objetivo do uso do modelo paramétrico nesta pesquisa. O destaque está na exploração dessas relações que desencadeiam as modificações sequenciais, reforçando a importância da geometria no processo de projeto arquitetônico.

Além disso, assim como o próprio desenho paramétrico exige uma relação entre elementos para desenvolver o modelo, o mesmo ocorre entre os diferentes modelos/projetos. Os saberes estruturados para um projeto constituem-se como referência para os outros, sendo inclusive partes de sua estrutura de saber (teorias, técnicas e tecnologias de representação gráfica digital) aproveitadas. Essa é a contribuição mais significativa desta pesquisa. Inicialmente, quando os projetos foram selecionados para análise, não se considerou a relação entre eles como um fator relevante para a escolha. Pelo contrário, foram selecionados projetos que apresentavam diferentes abordagens das malhas na arquitetura.

A modelagem paramétrica exige o pensamento de construção geométrica, pois mantém a lógica construtiva da geometria para o modelo. A abordagem adotada nessa pesquisa demonstrou que a geometria está conectada à diversas soluções arquitetônicas, evidenciadas pela modelagem paramétrica. Nesta abordagem, a interdisciplinaridade da arquitetura passa a ser destacada, porque há

uma associação dos conceitos de geometria com os requisitos projetuais. Embora isso seja uma questão pertinente tanto à arquitetura analógica quanto à digital, é no ambiente paramétrico que as questões geométricas podem ser avaliadas em relação às suas propriedades e ao desempenho do projeto. Destacam-se as questões de sustentabilidade, cada vez mais relevantes nos projetos da atualidade e que passam a ser relacionadas com sua geometria final.

Nessa pesquisa, o interesse reside no estudo de geometrias da arquitetura que integrem um projeto interdisciplinar e que sejam utilizadas em projetos contemporâneos que passam a ser referenciais. Há um caráter didático, pois a partir da explicitação do saber envolvido na estrutura geométrica de obras referenciais, é possível levar essas questões ao ensino por meio da representação, contribuindo para uma formação mais integrada e corresponsável com as questões ambientais.

Preparar os estudantes para estarem cada vez mais capacitados para as novas tecnologias exige também um avanço nos materiais didáticos que suportam o ensino, principalmente quando se tratam de saberes ainda não reconhecidos no contexto educacional. A utilização da programação visual, juntamente com uma estrutura de saber que introduz os principais conceitos geométricos aos estudantes, contribui com a formação de novos arquitetos capacitados para a prática profissional por meio do desenho paramétrico.

Uma vez que a base do projeto paramétrico está na geometria, promover o conhecimento dessa área associando-a a outras estruturas amplia as possibilidades de os estudantes explorarem as tecnologias digitais de representação na elaboração de seus projetos. Dessa maneira, torna-se indispensável a contribuição dessas estruturas para a proposição de materiais didáticos que abordem o saber da geometria e da representação gráfica digital, direcionados a vários níveis de formação em arquitetura. Ao abordar uma visão mais holística, permite-se que os estudantes compreendam as interações entre a geometria, a tecnologia e o impacto dos edifícios no meio em que se inserem. Ao desenvolver habilidades de pensamento crítico e criativo, aliadas à clareza sobre os princípios geométricos, os arquitetos do futuro poderão estar mais preparados para enfrentar os desafios complexos da profissão, projetando espaços que sejam esteticamente atraentes, funcionalmente eficientes e ambientalmente responsáveis.

Acredita-se que este estudo contribua para que, no futuro, ensino e prática profissional estejam mais interligados. Enquanto isso, projetos referenciais são a maneira de extrair o saber implícito na arquitetura contemporânea. Portanto, a inclusão das estruturas de saber da geometria e da representação gráfica digital nos materiais didáticos de arquitetura proporciona uma formação mais completa e atualizada, para capacitar os estudantes a se tornarem profissionais aptos a enfrentar as demandas contemporâneas da profissão e a impulsionar a evolução da arquitetura.

8.1. Indicação de trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, buscou-se uma explicitação e construção gradual do saber referente aos projetos analisados. Porém, observou-se que para uma das obras foi necessário retornar ao projeto após o desenvolvimento das demais estruturas de saber. Ou seja, pode-se avançar na explicitação dos elementos da estrutura de saber (técnicos e tecnológicos) relacionados ao Pavilhão Shellstar somente quando este foi revisto a partir das estruturas anteriores (Biosfera de Montreal, Projeto Éden e Water Cube). Portanto, mesmo que tenha sido identificada uma sequência de complexidade crescente entre as obras, é importante destacar o potencial de revisão periódica das estruturas para complementá-las. Dessa maneira, obtém-se uma estrutura cada vez mais integrada, enfatizando as relações entre os projetos.

A fim de dar continuidade ao trabalho desenvolvido, é necessário ressaltar que sua estrutura permite diversos desdobramentos que estudem os mais variados elementos da representação gráfica. Nessa dissertação, foram abordadas questões relevantes relacionadas ao uso de malhas, mas essas abordagens podem ser replicadas para compreender o saber associado a novas estruturas abordadas na representação digital. Nesse sentido, também é possível explorar, em trabalhos futuros, a identificação dos conceitos elementares para cada grupo de projetos contemporâneos, que indiquem alguma similaridade geométrica. Selecionar obras que compartilhem alguns elementos ou requisitos projetuais e estudar quais conceitos geométricos as tornam inter-relacionadas, podendo até mesmo vir a se configurar uma rede de relações entre projetos da arquitetura contemporânea.

Referências

ALLISON, Chloe. **Meshing in FEA**: Introduction to meshing. Onscale, 2020. Disponível em: <https://onscale.com/blog/meshing-in-fea-introduction-to-meshing/>. Acesso em: 12 jan. 2022.

ALMEIDA, Marcela; NOGUEIRA, Yasmin. **Parametricism as style**: the relationship between methodology of scientific research programmes and parametric design. p. 17-22. In: São Paulo: Blucher, 2018. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/sigradi2018-1300

ANCHETA-ADRIAS, Ria. **1/365: Flag of Hong Kong**. 8 set. 2008. Fotografia. Disponível em: < <https://tinyurl.com/yn38s7xh>>. Acesso em: 21 abril 2023.

ARAUJO, Andre; CELANI, Gabriela. **Exploring Weaire-Phelan through cellular automata**: A proposal for a structural variance-producing engine. p. 710-714. In: XX Congresso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital [=Blucher Design Proceedings, v.3 n.1]. São Paulo: Blucher, 2016. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/despro-sigradi2016-450

ARUP. **National Aquatics Center** (Water Cube), 2022. Projects. Disponível em: <<https://www.arup.com/projects/chinese-national-aquatics-center/>>. Acesso em: 26 de out. de 2022.

ASANOWICZ, Aleksander. Parametric design - Tool, medium or new paradigm?. In: Fioravanti, A, Cursi, S, Elahmar, S, Gargaro, S, Loffreda, G, Novembri, G, Trento, A (eds.), ShoCK! - Sharing Computational Knowledge! - **Proceedings of the 35th eCAADe Conference** - Volume 2, Sapienza University of Rome, Rome, Italy, 20-22 September 2017, pp. 379-386. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2017_038>. Acesso em: 13 abril 2021.

BEAUVOIS, Romain. **Biosphere**. 17 dez. 2011. Fotografia. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/romainbeauvois/6569658749//>>. Acesso em: 21 set. 2021.

BERTOL, Daniela. **Form Geometry Structure**: From Nature to Design. 1. ed. Estados Unidos: Bentley Institute Press, 2011. 232 p. ISBN 1934493112.

BLANCO, Guillermo Luciano Carone. Munich Olympic Stadium. WikiArquitectura. Barcelona, [s.d.]. Disponível em: <<https://en.wikiarquitectura.com/building/munich-olympic-stadium/>>. Acesso em: 2 fev. 2022.

BLOSSER, M.; NOLAS, G. Synthesis of Na₈Si₄₆ and Na₂₄Si₁₃₆ by oxidation of Na₄Si₄ from ionic liquid decomposition. **Materials Letters**, v. 99, p. 161-163, 2013. DOI:10.1016/j.matlet.2013.03.020

BOAKE, Terri. Biosphere, U.S. Pavilion, Expo 67. **Terri Meyer Boake**. 2008. Disponível em: <https://www.tboake.com/expo67.html>. Acesso em: 25 jan. 2022.

BORDA, Adriane Borda Almeida da Silva. **Los saberes constitutivos del Modelado Geométrico y Visual, desde las instituciones científicas y profesionales a las escuelas de arquitectura: Un análisis de Transposición Didáctica**. Orientador: Francisco José Serón Arbeloa e Javier Arlegui de Pablos. Tese (Doutorado em Didáctica de Las Ciências Experimentales) - Programa de Pós-graduação em

Filosofía y Ciencias de la Educación, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Espanha, 2001.

BRITTO, Fernanda. Estádio Olímpico de Munique / Frei Otto & Gunther Behnisch. **ArchDaily Brasil**. 25 Fev 2012. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/01-34759/estadio-olimpico-de-munIQUE-frei-otto-e-gunther-behnisch>>. Acessado em: 20 de set. de 2021. ISSN 0719-8906

BROWN, Eric Harvey. **Part of 'Biosphere', designed by Buckminster Fuller**. 18 ago. 2006. Fotografia. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/dogseat/226688460>>. Acesso em: 05 maio 2021.

BRUNDTLAND, Gro Harlem. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. **United Nations General Assembly document A/42/427**, 1987 BURRY, Jane; BURRY, Mark. The new mathematics of architecture. Thames & Hudson. 2010

BURRY, Jane; BURRY, Mark. **The new mathematics of architecture**. Thames & Hudson. 2010

BURTON, Dan. **Aerial view of the Eden Project. St Austel, Cornwall. England, UK**. 22 abril 2010. Fotografia. Disponível em: <<https://www.alamy.com/stock-photo-aerial-view-of-the-eden-project-st-austel-cornwall-england-uk-29228072.html?imageid=ED8A0A6B-DE6A-4D2C-8FDC-DAB14C0E91C8&p=14317&pn=1&searchId=8b5ca931554317f7bac22e9325c07288&searchtype=0>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

CAMPOS, F. M. **Análises paramétricas**. Entrevista com Neil Katz. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M (Organizadores). Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão. São Paulo: ProBooks, 2018. p. 230-232.

CANESTRINO, Giuseppe. **Considerations on optimization as an architectural design tool**. Nexus Network Journal, v. 23, p. 919-931, 2021. DOI: 10.1007/s00004-021-00563-y

CARMO, M. P. **Superfícies Mínimas**. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA, 1987.

CELANI, G; BARBOSA NETO, W; FRANCO, J. M. S. **Do projeto à fabricação**. Entrevista com Peter Mehrrens. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M (Organizadores). Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão. São Paulo: ProBooks,

CELANI, Gabriela. **Uma nova era para a arquitetura**. In: CELANI, G.; SEDREZ, M. (Organizadores). Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão. São Paulo: ProBooks, 2018. P. 17 a 20.

CHEVALLARD, Y. El Análisis de las Prácticas Docentes en la Teoría Antropológica de Lo Didáctico. **Recherches en Didactique de Mathématiques**, Grenoble, Vol. 19, nº 2, pp. 221-266, 1999.

CHEVALLARD, Y. **La Transposición Didáctica: del saber sabio al saber enseñado.** La Pensée Sauvage, Argentina, 1991.

CHI, Doris; GONZALEZ, Edwin; VALDIVIA, Renato; GUTIERREZ, Eduardo. Parametric Design and Comfort Optimization of Dynamic Shading Structures. **Sustainability**, v. 13, ed. 14, p. 1-27, 2021.

CLARKE, Paul. **British Museum Great Court roof from above.** 14 maio 2013. Fotografia. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/paul_clarke/15862806015>. Acesso em: 21 set. 2021.

CROMWELL, Peter. **Polyhedra.** 1. ed. Reino Unido: Cambridge University Press, 1997. 476 p. ISBN 9-521-55432-2.

ECCLES, Robert; EDMONDSON, Amy; KARADZHOVA, Dilyana. **Arup: Building the Water Cube.** Harvard Business School, Case 410-054, p. 21, 2010

EDEN Project. **Eden Project**, c2022. Architecture. Disponível em: <<https://www.edenproject.com/mission/about-our-mission/architecture/>>. Acesso em: 02 de ago. de 2022.

EDMONDSON, Amy. **A Fuller Explanation: The Synergetic Geometry of R.** Buckminster Fuller. 1. ed. Boston, MA: Birkhäuser, 1987. 302 p. ISBN 978-0-8176-3338-7.

ELKADER, Morad Abd; EL GENDY, Marwa Abd Elkader. Mathematics behind the Cell Bubble Structure to Achieve Sustainability. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, [s. l.], v. 5, ed. 7, p. 37-42, jul. 2016. DOI 10.17577/IJERTV5IS070053. Disponível em: <https://www.ijert.org/mathematics-behind-the-cell-bubble-structure-to-achieve-sustainability>. Acesso em: 7 dez. 2022.

ELOY, Sara; CRUZ, André. Será o digital um equívoco na Arquitetura?. **arq.Urb**, n. 8, p. 200-209. 2012. Disponível em: <<https://www.revistaarqurb.com.br/arqurb/article/view/347>>. Acesso em: 10 abr. 2021.

FAMILIA, Sagrada. **Modelo de cordas suspensas de Antoni Gaudí para A Sagrada Família.** 10 jan. 2018. Fotografia. Disponível em: <<https://blog.sagradafamilia.org/en/divulgation/the-sagrada-familia-repository-of-other-gaudi-projects/>>. Acesso em: 14 set. 2023.

FIRBY, Peter; GARDINER, Cyril. **Surface Topology.** 3. ed. rev. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2001. 270 p. ISBN 1898563772.

FLEISCHMANN, Moritz; AHLQUIST, Sean. Cylindrical Mesh Morphologies: Study of Computational Meshes based on Parameters of Force, Material, and Space for the Design of Tension-Active Structures. **Computation: The New Realm of Architectural Design** [27th eCAADe Conference Proceedings / ISBN 978-0-9541183-8-9] Istanbul, Turkey, 16-19 September 2009, pp. 39-46, 2009.

FLORIO, Wilson. Modelagem paramétrica, criatividade e projeto: duas experiências com estudantes de arquitetura. **Gestão & Tecnologia De Projetos**, v.6, ed. 2, p. 43-66, 2011. DOI: 10.4237/gtp.v6i2.211

FOSTER + PARTNERS. **Great Court at the British Museum**. 2022. Fotografia. Disponível em: <<https://www.fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/>>. Acesso em: 21 set. 2021.

GERHARDT, T. E. SILVEIRA, D. T. **Orgs. Métodos de pesquisa**. Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica - Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GRIMSHAW. **The Eden Project: The Biomes**, 2022. Projects. Disponível em: <<https://grimshaw.global/projects/culture-and-exhibition-halls/the-eden-project-the-biomes/>>. Acesso em: 02 de ago. de 2022.

HERNANDEZ, Carlos Roberto. Parametric Gaudi. SIGraDi 2004, **Proceedings of the 8th Iberoamerican Congress of Digital Graphics**, Porte Alegre, Brasil, 2004.

HUBERS, J.C. Collaborative Design of Parametric Sustainable Architecture. **International Workshop on Computing in Civil Engineering 2011**, Miami, Estados Unidos, p. 413-420, 2011.

HUDSON, Roly. **Frameworks for practical parametric design in architecture**. in: Muylle, M. (ed), Education in computer aided architectural design in Europe. Antilope, Antwerp, Belgium. 2008, 847-854

HUERTA, S. Structural Design in the Work of Gaudi. **Architectural Science Review**. V. 49.4, pp. 324-339, 2006.

HWANG, Irene. **Verb Natures: 05**. [S. l.]: Actar, English ed., 2007. 280 p. ISBN 8496540219.

INCHBALD, Guy. Wearie-Phelan Bubbles. In: INCHBALD, Guy. **Steelpillow: The web sites of Guy Inchbald**. [S. l.], 19 mar. 2022. Disponível em: <http://www.steelpillow.com/polyhedra/wp/wp.html>. Acesso em: 25 nov. 2022.

JABI, Wassim; SOE, Shwe; THEOBALD, Peter; AISH, Robert; LANNON, Simon. Enhancing parametric design through non manifold topology. **Design Studies**, v. 52, 2017, p. 96-114, ISSN 0142-694X, DOI: 10.1016/j.destud.2017.04.003

JANBERG, Nicolas. **Roof over the buildings of the Olympic Park – Munich Olympic Stadium**. 15 mar. 2011. Fotografia. Disponível em: <<https://structurae.net/en/media/179177-roof-over-the-buildings-of-the-olympic-park-munich-olympic-stadium>>. Acesso em: 21 set. 2021.

JIPA, Andrei. **Plateau's Laws**. Nov 2012. Ilustração. Disponível em: <<http://infinitywashere.blogspot.com/2014/10/wiki-bubbles.html>>. Acesso em: 06 set. 2022.

KATZ, Neil. Algorithmic Modeling; Parametric Thinking: Computational Solutions to Design Problems: Conceptual Explorations and Practical Applications. **5th ASCAAD Conference Proceedings**, Fez, Morocco, p. 19-36, 2010. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ascaad2010_019>. Acesso em: 12 de out. de 2020.

KENNER, Hugh. **Geodesic Math and How to Use It**. 1. ed. Los Angeles, California: University of California Press, 1976. 173 p. ISBN 0-5 20-029 24-0.

KLOOK. **Beijing Tiananmen Square, The Forbidden City and Olympic Park Day Tour**. c2022. Fotografia. Disponível em: <<https://www.klook.com/en-HK/activity/5860-tiananmen-square-forbidden-city-olympic-park-tour-beijing/>>. Acesso em: 21 nov. 2022.

KNEBEL, Klaus; SANCHEZ-ALVAREZ, Jaime; ZIMMERMANN, Stefan. The structural making of the Eden Domes. **Space Structures** 5, v. 1, p. 245-254, 2002. DOI: 10.1680/ss5v1.31739.0026.

KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. New York: Taylor & Francis, 2005. 320 p. ISBN 0-415-27820-1.

KRUTEIN, Wernher. **United States Pavilion, USA, Geodesic Dome, Expo-67, American, Montreal Biosphere, Buckminster Fuller**. c2022. Fotografia. Disponível em: <<https://photovault.com/244455>>. Acesso em: 05 maio 2021.

LACOMBE, Octavio. **Diagramas digitais: pensamento e gênese da arquitetura mediada por tecnologias numéricas**. 2006. Tese (Doutorado em Projeto, Espaço e Cultura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. doi:10.11606/T.16.2006.tde-09082006-143023.

LANGDON, David. AD Classics: Montreal Biosphere / Buckminster Fuller. **ArchDaily**. 07 Oct 2018. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/572135/ad-classics-montreal-biosphere-buckminster-fuller>>. Acessado em: 20 de set. de 2021. ISSN 0719-8884

LARSEN, Olga Popovic; TYAS, Andy. Capsules of plant life from planet Earth: The Eden Project. DOI:10.1680/csdbgae.61101.169. In: LARSEN, Olga; TYAS, Andy. **Conceptual Structural Design: Bridging the gap between architects and engineers**. 2. ed. [S. l.]: ICE Virtual Library, 2016. cap. Case Study 3, p. 169-187. ISBN 978-0-7277-6110-1.

LEOPOLD, Cornelia. Principles of a Geometry Program for Architecture: Experiences, Examples, and Evaluations. **Journal for Geometry and Graphics**, v. 7, n. 1, p. 101-110, 2003. ISSN 1433-8157

LIDDELL, Ian. Frei Otto and the development of gridshells. **Case Studies in Structural Engineering**, v. 4, 2015, pp. 39-49, ISSN 2214-3998, DOI: 10.1016/j.csse.2015.08.001.

LIMA, Fabio. A prática da tesselação: racionalização construtiva de painéis arquitetônicos complexos. **Arquitetura Revista**, [S. l.], v. 17, n. 1, pp. 01–16, 2021. DOI: 10.4013/arq.2021.171.01.

LORENZI, Marcella; FRANCAVIGLIA, Mauro. Art & Mathematics in Antoni Gaudí's architecture: “La Sagrada Família”. In: Aplimat – **Journal of Applied Mathematics**, v. 3, n. 1, 2010, p. 125–145

LUO, Feng. Rigidity of polyhedral surfaces. **Journal of Differential Geometry**, Lehigh University, v. 96, n. 2, p. 241-302. 2014. DOI 10.4310/jdg/1393424919.

MARIANO, Pedro; PIRES, Janice. Parametric Otto: Validation of a Visual Programming for the Generation of Minimum Surfaces Conformed by Physical Forces. In: Cheng, LY. (eds) ICGG 2020 - Proceedings of the 19th International Conference on Geometry and Graphics. ICGG 2021. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 1296, 2021. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-63403-2_25

MASSEY, Jonathan. Buckminster Fuller's cybernetic pastoral: the United States Pavilion at Expo 67. **The Journal of Architecture**, v. 21, ed. 5, pp. 795-815, 2016. DOI: 10.1080/13602365.2016.1207433.

MATSYS. Shellstar Pavilion. **Matsys**. c2022. Disponível em: <https://www.matsys.design/shellstar-pavilion>. Acesso em: 20 abr. 2023.

MEAN (Middle East Architecture Network). Shell Star. **MEAN DESIGN**, c2023. Disponível em: <https://www.m-e-a-n.design/projects/shell-star>. Acesso em: 20 abr. 2023.

MERCADANTE, Mauricio. **Unha-de-vaca (Bauhinia x blakeana)**. Fev. 2010. Fotografia. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/43256055@N03/4422623500>. Acesso em: 21 abril 2023.

MICOOGULLARI, Hena. PARAMETRIC FACADE: BEIJING WATER CUBE. In: **Institute of Advanced Architecture of Catalonia**. [S. l.], 31 out. 2018. Disponível em: www.iaacblog.com/programs/parametric-facade-beijing-water-cube/. Acesso em: 2 fev. 2022.

MITCHELL, William J. **The logic of architecture: Design, Computation, and Cognition**. Cambridge, Mass: Mit Press, 1990. 292 p. ISBN 0262132389. Disponível em: https://openlibrary.org/works/OL15277298W/The_logic_of_architecture?edition=key%3A/books/OL2049665M. Acesso em: 20 dez. 2022.

MONTREAL Biosphère of 1967 - Buckminster Fuller. **ArchEyes**. 9 abril 2016. Disponível em: <https://archeyes.com/montreal-biosphere-1967-buckminster-fuller>. Acesso em: 05 maio 2021.

NOWAK, Anna. Application of Voronoi diagrams in contemporary architecture and town planning. **Challenges of Modern Technology**, v. 6, n. 2, p. 30-34, 2015.

NUNES, R. M.. **Aerial view of the Montreal Biosphere environment museum at Parc Jean-Drapeau in Montreal, Quebec, Canada**. 3 jul. 2016b. Fotografia. Disponível em: <<https://www.alamy.com/aerial-view-of-the-montreal-biosphere-environment-museum-at-parc-jean-drapeau-in-montreal-quebec-canada-image338560993.html>>. Acesso em: 02 maio 2021.

NUNES, R. M.. **Top-down aerial view of the Montreal Biosphere environment museum at Parc Jean-Drapeau in Montreal, Quebec, Canada**. 3 jul. 2016a. Fotografia. Disponível em: <<https://www.alamy.com/top-down-aerial-view-of-the-montreal-biosphere-environment-museum-at-parc-jean-drapeau-in-montreal-quebec-canada-image338561073.html>>. Acesso em: 02 maio 2021.

OLIVEIRA, Bruna Pereira de; PIRES, Janice de Freitas. Biomimética e representação gráfica: abordagem integrada ao processo projetual em arquitetura. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. v.10, n. esp, p. 180-192, 2021.

PAN, Qing; XU, Guoliang; XU, Gang; ZHANG, Yongjie. Isogeometric analysis based on extended Catmull–Clark subdivision. **Computers & Mathematics with Applications**, v.71, ed. 1, 2016, p. 105-119, ISSN 0898-1221, doi: 10.1016/j.camwa.2015.11.012.

PAZINI, Ernani Zandoná; MUSSI, Andréa Quadrado. Parametric Design: measuring learning states. In: Ji-Hyun Lee (Eds.). 18th International Conference, **CAAD Futures 2019**, Proceedings, Daejeon, Korea, p. 485-498. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/data/works/att/cf2019_058.pdf>. Acesso em: 14 de jun. 2020. ISBN 978-89-89453-05-5

PEROTTONI, Claudio; DA JORNADA, João Alziro. The carbon analogues of type-I silicon clathrates. **Journal of Physics: Condensed Matter**, [s. l.], v. 13, n. 26, p. 5981-5998, 2001. DOI: 10.1088/0953-8984/13/26/313

PETERS, Terri. Experimental green strategies: redefining ecological design research. **Architectural Design**, v. 81, ed. 6, p. 14-19, 2011. doi: 10.1002/ad.1314

PIACENTINO, Giulio. **Weaverbird**: Topological Mesh Editor. v. 0.9.0.1, [S.l.], 31 ago. 2009. Disponível em: <https://www.giuliopiacentino.com/weaverbird/>. Acesso em: 9 maio 2022.

PICKLEDSQUID. **Crystal structure of the inorganic clathrate compound Na₈Si₄₆**. 10 nov. 2022. Ilustração. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Clathrate_compound>. Acesso em: 14 nov. 2022.

PIETRONI, Nico, TONELLI, Davide, PUPPO, Enrico, FROLI, Maurizio, SCOPIGNO, Roberto, CIGNONI, Paolo. Voronoi Grid-Shell Structures. **arXiv**, v. 1, pp. 1–10, 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1408.6591

PIRES, Janice de Freitas. **A constituição de uma rede de conceitos da geometria complexa da arquitetura contemporânea**: das teorias a modelagem paramétrica das superfícies. Orientador: Alice Theresinha Cybis Pereira. 2018. 425 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo,

Florianópolis, 2018. Disponível em:
<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/198592>. Acesso em: 10 ago. 2022.

PIRES, J. de F.; PEREIRA, A. T. C. A estruturação do saber relacionado a geometria complexa e a modelagem paramétrica de estruturas regenerativas na arquitetura. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 90-110, 2019. DOI: 10.11606/gtp.v14i1.148024.

PIRES, J. F.; PEREIRA, A. T. C.; GONÇALVES, A. Taxonomias de geometria da arquitetura contemporânea: uma abordagem didática ao ensino da modelagem paramétrica na arquitetura. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 12, n. 3, p. 27-46 2017. DOI: 10.11606/gtp.v12i3.133954

PIRES, Janice de Freitas; SILVA, Adriane Borda Almeida da. Inserção da representação gráfica digital em estágios iniciais da prática projetual de arquitetura. **Revista Educação Gráfica**, v. 16, pp. 72-87, 2012.

POHL, Ethel Baraona. **Watercube: The Book**. Espanha: Dpr editorial, 2008. 326 p. ISBN 978-84-612-4419-5. E-book (326p.).0.0114

POTTMANN, H.; SCHIFTNER, A.; WALLNET, J. Geometry of architectural freeform structures. **Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling - SPM '08**, 209, 15–28. 2008. <https://doi.org/10.1145/1364901.1364903>

POTTMANN, Helmut; ASPERL, Andreas; HOFER, Michael; KILIAN, Axel. **Architectural Geometry**. 1. ed. Exton, Pa: Bentley Institute Press, 2007. 744 p. ISBN 978-0-934493-04-5.

PTW Architects. **Watercube National Swimming Centre**. 2022. Fotografia. Disponível em: <<https://www.ptw.com.au/project/watercube-national-swimming-centre/>>. Acesso em: 21 set. 2021.

RAGHU, Deepika. Shellstar Pavilion. **IAAC (Institute for Advanced Architecture of Catalonia) Blog**. 03 dez. 2019. Disponível em: <https://www.iaacblog.com/programs/animated-system-shellstar-pavilion/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

RICHARDSON, Amy. **Camadas das almofadas de ETFE**. Outubro, 2020. Ilustração. Disponível em: <<https://www.architen.com/articles/etfe-foil-a-guide-to-design/>>. Acesso em: 14 set. 2022.

ROLETSCHEK, Ralf. **Montreal Biosphere**. 9 ago. 2017. Fotografia. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:17-08-islcanus-RalfR-DSC_3883.jpg>. Acesso em: 02 maio 2021.

ROMCY, Neliza Maria e Silva; TINOCO, Marcelo Bezerra de Melo; CARDOSO, Daniel Ribeiro. Reflexões sobre a introdução da abordagem paramétrica no ensino de projeto. **VIRUS**, São Carlos, n. 11, 2015. [online] Disponível em: <<http://www.nomads.usp.br/virus/virus11/index.php?sec=4&item=2&lang=pt>>. Acesso em: 22 Jun. 2023.

SANZ, M. A.; MORATALLA, A. Simetría. Serie Geometría y Arquitectura II, Cuadernos de Apoyo a la Docencia del Instituto Juan de Herrera. Madrid: Publicaciones de la Escuela Superior de Arquitectura de Madrid, 1999.

SEDREZ, M. **Fabricação digital no Brasil**. Entrevista com Guto Requena. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M (Organizadores). Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão. São Paulo: ProBooks, 2018a. p. 212-219.

SEDREZ, M. **Projetando e fabricando a complexidade**. Entrevista com Florian Gauss. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M. (Organizadores). Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão. São Paulo: ProBooks, 2018b. p. 161-166

SEIFERT, Nils; PETZOLD, Frank. Architects & Algorithms - Developing Interactive Visualizations for Architectural Communication. **Proceedings of the 36th eCAADe Conference**, Volume 1, Lodz University of Technology, Lodz, Poland, 19-21 September 2018, p. 361-370. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2018_335>. Acesso em: 18 jan. 2021.

SENSES, Nilufer. **Foam Structures**: A comparative structural efficiency analysis based on the building case Watercube. Orientador: Margit Pfeiffer-Rudy. 2007. 78 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Projeto Estrutural e Engenharia Madeireira, TU Vienna, 2007.

SHIMADA, Kenji; GOSSARD, David. Automatic triangular mesh generation of trimmed parametric surfaces for finite element analysis. **Computer Aided Geometric Design**, v.15, ed.3, 199–222. 1998. DOI: 10.1016/S0167-8396(97)00037-X

SILVA, Adriane Borda Almeida da; PIRES, Janice de Freitas; CONILL, Elisabeth da Rosa; FÉLIX, Neusa Rodrigues. Technological language x scientific language: Structuring educational speeches for the area of digital graphics. **SIGraDi 2007 - [Proceedings of the 11th Iberoamerican Congress of Digital Graphics]**, México, p. 141-145, 23 out. 2007. Disponível em: https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2007_af87. Acesso em: 23 jun. 2023.

SILVA, Adriane Borda Almeida da; PIRES, Janice de Freitas; VASCONSELOS, Tássia; NUNES, Cristiane. Trajetórias de aprendizagem em representação gráfica digital. **Revista Educação Gráfica**, v. 16, p. 5-22, 2012.

SINGLA, Saurabh. Animated Systems: Shellstar Pavilion. **IAAC (Institute for Advanced Architecture of Catalonia) Blog**. 01 dez. 2019. Disponível em: <https://www.iaacblog.com/programs/animated-systems-shellstar-pavilion-2/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

SPERLING, David; HERRERA, Pablo; SCHEEREN, Rodrigo. Fabricating (Other) Computations: Digital Fabrication and Technological Appropriation in Latin America. **Dearq**, n. 27, p. 76-87, 2020. DOI: 10.18389/dearq27.2020.06.

STALS, Adeline; JANCART, Sylvie; ELSSEN, Catherine. Influence of Parametric Tools on the Complexity of Architectural Design in Everyday Work of SME's. **Archnet-IJAR**:

International Journal of Architectural Research, v. 12, ed. 3, p. 206-227, 2018.
DOI: 10.26687/archnet-ijar.v12i3.1665

STALS, Adeline; JANCART, Sylvie; ELSEN, Catherine. Parametric modeling tools in small architectural offices: Towards an adapted design process model. **Design Studies**, volume 72, 2021. ISSN 0142-694X. DOI: 10.1016/j.destud.2020.100978

SZALAPAJ, P. The Digital Design Process in Contemporary Architectural Practice. **Digital Design: The Quest for New Paradigms (23rd eCAADe Conference Proceedings)**, Lisbon, Portugal, 21-24 September 2005, pp. 751-759. ISBN 0-9541183-3-2

VESTARTAS, Petras; RAD, Aryan Rezaei. **NGon**: Tool for mesh processing and engineering design. v. 2.4.5, Zenodo, 2021. DOI: 10.5281/zenodo.4550592

VIDLER, Steve. **Inglatera, Cornwall, St.Austell, el Eden Project, el bioma interior**. c2022. Fotografia. Disponível em: <<https://www.alamy.es/foto-inglaterra-cornwall-st-austell-el-eden-project-el-bioma-interior-59828313.html>>. Acesso em: 14 set. 2022.

WANNAN, Samer R. Teaching Parametric Design in Architecture - A Case Study. **Parametricism Vs. Materialism: Evolution of Digital Technologies for Development (8th ASCAAD Conference Proceedings)**, London, United Kingdom, 7-8 November 2016, p. 357-366, ISBN 978-0-9955691-0-2

WEAIRE, Denis; ASTE, Tomaso. **The Pursuit of Perfect Packing**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2008. 216 p. ISBN 9780429138645. DOI: 10.1201/9781420068184

WEAIRE, Denis; PHELAN, Robert. A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces. **Philosophical Magazine Letters**, v. 69, ed. 2, p. 107-110, 1994. DOI: 10.1080/09500839408241577

WEISSTEIN, Eric. **Symmetry**. From MathWorld--A Wolfram Web Resource. c2022b. Disponível em: <<https://mathworld.wolfram.com/Symmetry.html>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

WEISSTEIN, Eric. **Tetradecahedron**. From MathWorld--A Wolfram Web Resource. c2022a. Disponível em: <<https://mathworld.wolfram.com/Tetradecahedron.html>>. Acesso em: 22 nov. 2022.

WIRED. **China's Bubbly Aquatics Center Nears Completion**. Wired. In: NAST, Condé. Wired. [S. l.], 3 jul. 2007. Disponível em: <<https://www.wired.com/2007/07/chinas-bubbly-aquatics-center-nears-completion/>>. Acesso em: 17 nov. 2022.

WOODBURY, Robert. **Elements of Parametric Design**. 1. ed. Abingdon, Oxon: Routledge, 2010. 300 p. ISBN 0-415-77986-3.

WU, Michael. **Biosphere**. 30 jun. 2005. Fotografia. Disponível em: <https://live.staticflickr.com/17/23259378_9259e46615_k.jpg>. Acesso em: 21 set. 2021.

XIAOSHAN, Wu. **The National Aquatics Center lights up on June 23, 2022, to celebrate this year's International Olympic Day**. 20 jun. 2022. Fotografia. Disponível em: <http://www.china.org.cn/sports/2022-06/28/content_78293757.htm>. Acesso em: 08 nov. 2022.

ZAVATTIERI Pablo, DARI Enzo, BUSCAGLIA Gustavo. Optimization strategies in unstructured mesh generation. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 39, p. 2055 –2071, 1996

ZEXIN, Sun; MEI, Hongyuan. **Experimentos com películas de sabão de Frei Otto**. 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 216, Seoul, Korea. DOI: 10.1088/1757-899X/216/1/012058

ZIEGLER, Garrett. **Beijing National Aquatics Center**. 4 mar. 2013. Fotografia. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/garretziegler/8595216932/>>. Acesso em: 21 set. 2021.

ZOU, Patrick; LESLIE-CARTER, Rob. Lessons Learned from Managing the Design of the 'Water Cube' National Swimming Centre for the Beijing 2008 Olympic Games. **Architectural Engineering and Design Management**, v. 6, ed. 3, p. 175-188, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.3763/aedm.201>

Apêndices

Apêndice A – Modelagem do Projeto Éden

Conforme descrito no Capítulo 5, foi necessário modelar quatro geodésicas distintas. As etapas 1 e 2 (Figura AP 1) definem, tal como na Biosfera de Montreal, respectivamente: o sólido base, o icosaedro (Figura AP 2 A); e a subdivisão das faces, resultante da frequência (Figura AP 2 B), com um detalhe em projeção paralela ortogonal de uma das faces subdivididas dos icosaedros na Figura AP 2 C.

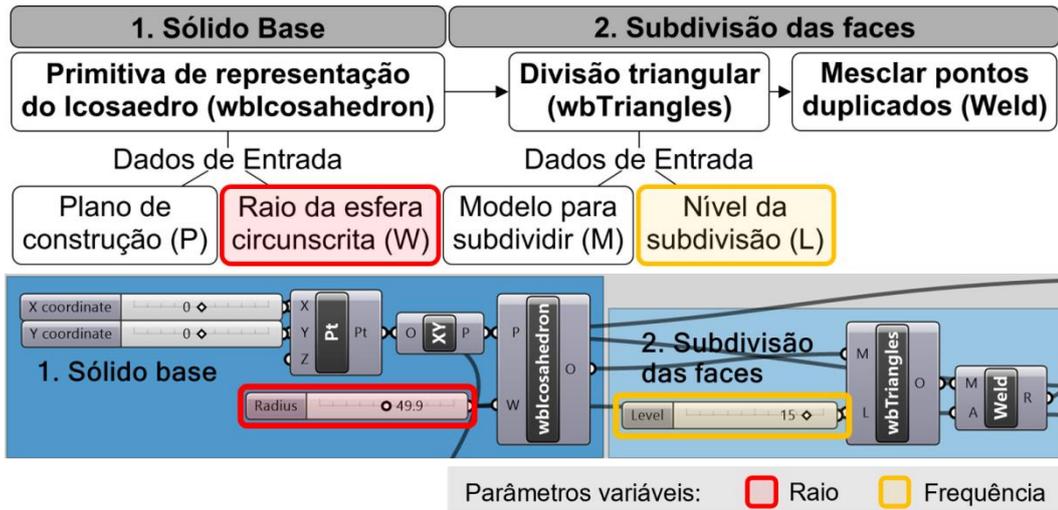


Figura AP 1 Esquema visual das etapas 1 e 2 da modelagem da primeira geodésica do Projeto Éden. Fonte: Elaboração própria.

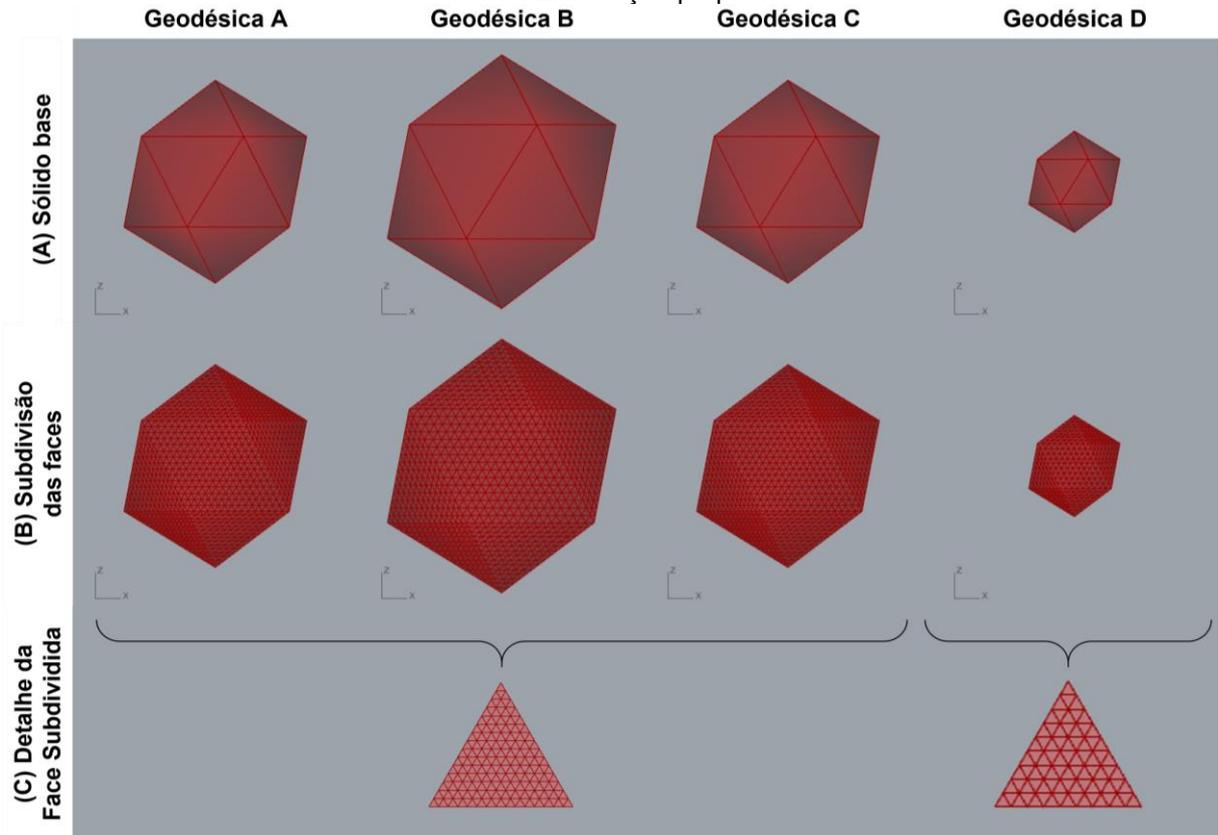


Figura AP 2 Representação gráfica das etapas 1 e 2 da modelagem do Projeto Éden. Fonte: Elaboração própria.

Ainda na Etapa 1 é necessário definir a localização do centro de cada geodésica. A primeira geodésica é inserida a partir de um sistema de coordenadas (X, Y e Z), como foi mostrado nas etapas anteriores, enquanto que as demais possuem seu lugar geométrico (localização do centro) como resultados das relações de distância entre as geodésicas. Ou seja, o centro da geodésica A é definido com parâmetros para as coordenadas X e Y na origem do sistema (0,0,0). Enquanto que as demais geodésicas têm seus centros delimitados a partir da representação de pontos configurados pelo sistema de coordenadas polar (componente *Pt* na programação visual). Neste sistema são inseridos os dados relativos ao ângulo formado entre um ponto de referência e o novo ponto que será representado, assim como a distância entre eles. Para a coordenada Z, conforme anteriormente descrito, considera-se um valor constante e igual a zero, devido aos centros das geodésicas estarem na mesma altura (sobre uma única linha). A Figura AP 3 apresenta a estrutura referente ao posicionamento dos centros das geodésicas B, C e D.

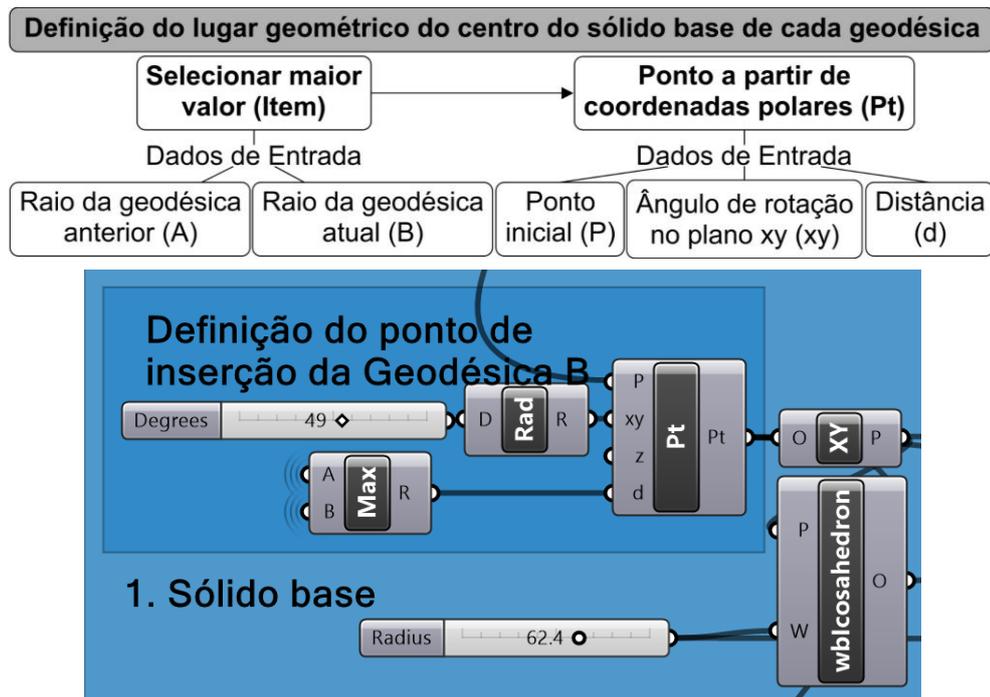
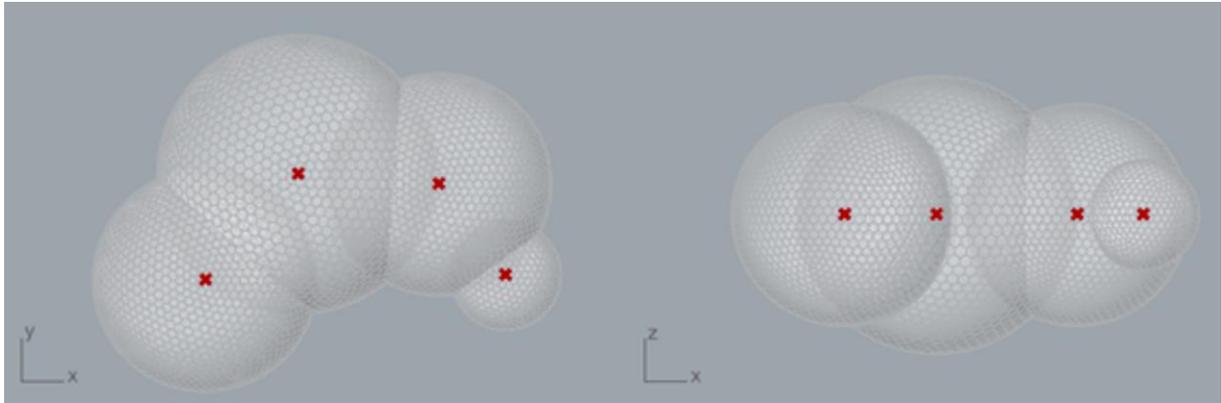


Figura AP 3 Obtenção dos pontos de inserção das demais geodésicas.
Fonte: Elaboração própria.

Para determinar o valor que será utilizado no sistema de coordenada polar, identifica-se o maior raio entre a geodésica que está sendo modelada e a anterior a ela. Para isso, aplica-se um componente de programação que opera esta seleção, denominado de "Maximum" (*Max*), o qual extrai o maior valor entre os dados de

entrada. O resultado pode ser visto na Figura AP 4 A em vista superior, destacando o sistema de coordenada polar, e na Figura AP 4 B reforçando o plano horizontal de inserção dos pontos e suas coordenadas idênticas para Z.



(A) Vista superior os pontos

(B) Vista frontal os pontos

Figura AP 4 Representação gráfica da inserção dos pontos centrais de todas geodésicas do Projeto Éden.

Fonte: Elaboração própria.

Na etapa 3.1 (Figura AP 5) há o processo de modelagem da malha geodésica, uma malha triangular projetada na esfera que circunscribe o icosaedro.

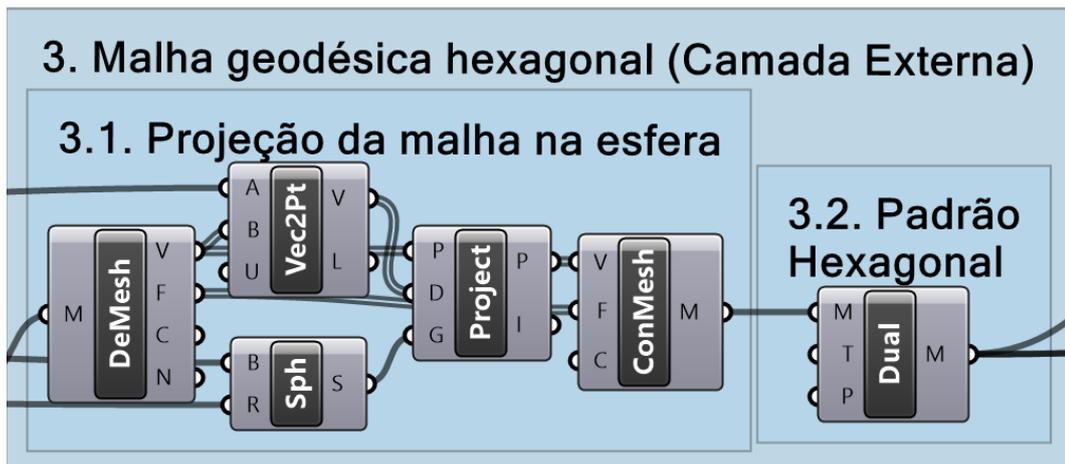
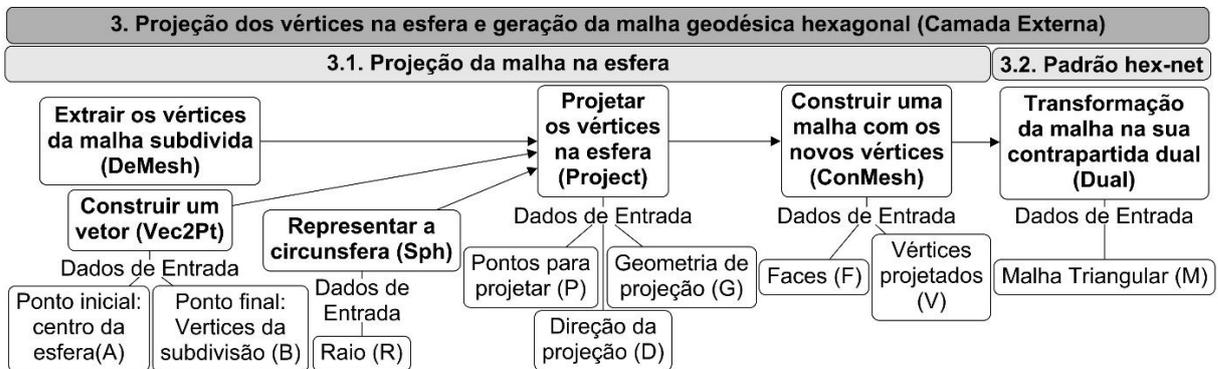


Figura AP 5 Esquema visual da etapa 3 da modelagem do Projeto Éden.

Fonte: Elaboração própria.

Na etapa 3.1, parte-se da desconstrução da malha subdividida (ainda formando um icosaedro) a fim de se obter seus vértices. A representação da circunferência ao redor do sólido platônico (Figura AP 6 A) e projeção desses vértices na esfera (Figura AP 6 B). Assim como ocorreu na Biosfera, a reconstrução dessa malha como uma geodésica triangular (Figura AP 6 C). Na etapa 3.2, transforma-se as faces triangulares em hexagonais (*Dual*), conforme Figura AP 6 D.

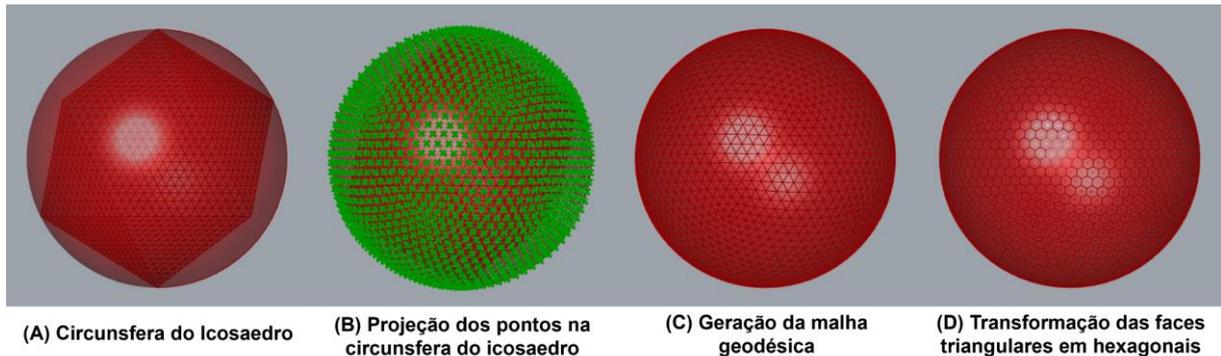


Figura AP 6 Representação gráfica da etapa 3 da modelagem do Projeto Éden.

Fonte: Elaboração própria.

Como as etapas 1, 2 e 3 repetem-se para cada geodésica do projeto, a representação do modelo é demonstrada com os resultados de cada etapa de modo sequencial. A Figura AP 7 refere-se ao processo descrito até então, sendo a composição de geodésica ilustrada em vista superior e perspectiva: (A) a localização dos pontos de inserção (centros das geodésicas); (B) os icosaedros inseridos em cada um deles; (C) suas circunferências; (D) e a composição de geodésicas, configurada pela interseção desses elementos e por suas malhas hexagonais.

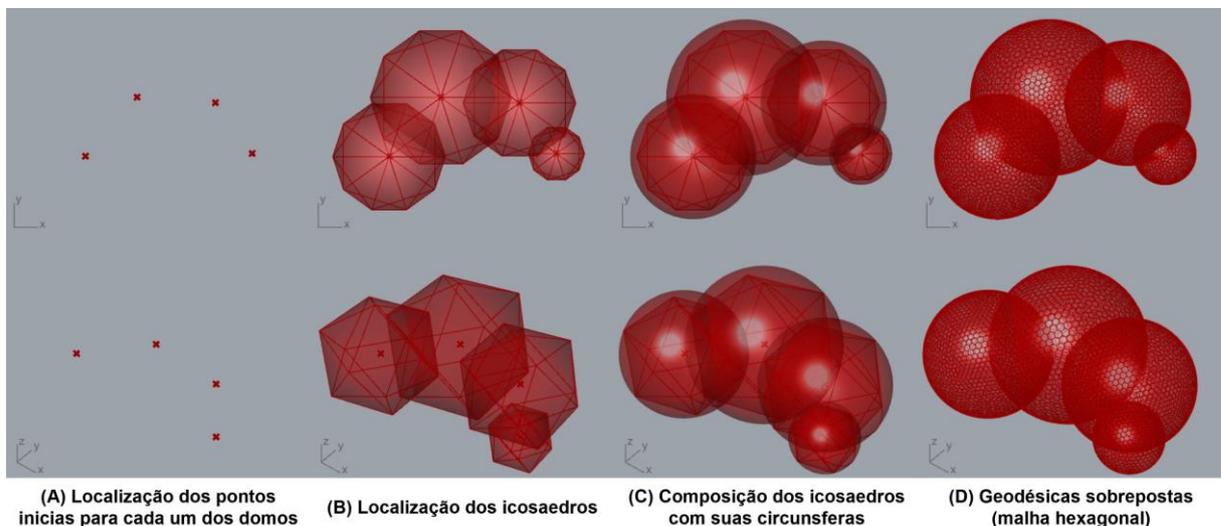


Figura AP 7 Vista superior e perspectiva das etapas iniciais para as quatro geodésicas.

Fonte: Elaboração própria.

A etapa 4 (Figura AP 8) representa o processo de construção da dupla camada de malha. Na etapa 4.1 realiza-se o processo de equidistância, obtendo-se uma camada de malha offset, que representa a camada interna do Projeto Éden. A etapa 4.2 se refere à transformação do padrão hexagonal no padrão *Tri-Hex-Net*.

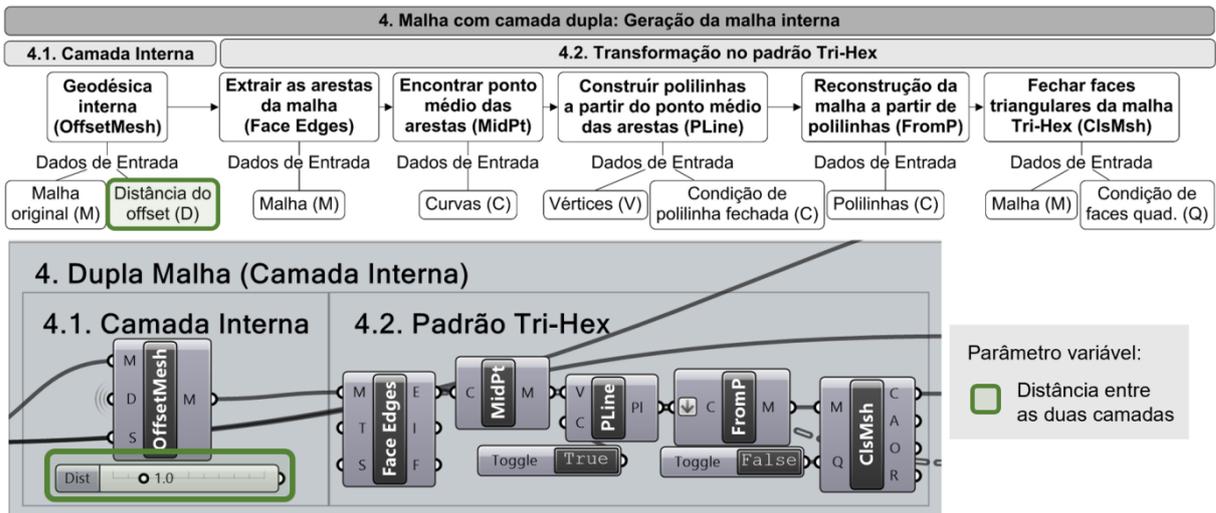


Figura AP 8 Esquema visual da etapa 4 da modelagem do Projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria.

Utilizando-se do componente “*OffsetMesh*” para cada uma das geodésicas, mas referenciando o mesmo valor para a distância, é possível manter constante o afastamento entre as duas camadas em toda a estufa (Figura AP 9 A). Enquanto que na Biosfera foi possível identificar a distância entre as camadas por meio do estabelecimento de uma relação de proporcionalidade a partir de um corte esquemático do projeto, as ilustrações equivalentes no Projeto Éden não mostram tal distância e destacam apenas a dimensão do revestimento inflado e não da estrutura. Então, para a programação visual, no parâmetro distância foi adotado um valor arbitrário igual a um, pois não foi encontrada informação sobre o afastamento entre as camadas.

Conforme já descrito anteriormente, o padrão geométrico da camada interna é diferente daquele visível na camada externa. Então, na etapa 4.2, configura-se esse padrão geométrico (segunda linha da Figura AP 9), em que a malha equidistante é desconstruída para extração das suas arestas, o ponto médio de cada uma delas é encontrado (Figura AP 9 D) e com esses pontos são construídos os hexágonos da malha interna (Figura AP 9 E), visualmente rotados em relação aos hexágonos da malha externa. Estes hexágonos são usados para gerar uma nova malha, por meio do componente “*From Polylines*” (*FromP*). O resultado ainda apresenta aberturas na

parte triangular do padrão geométrico (Figura AP 9 F) devido ao fato de que as polilinhas utilizadas no componente compreendem apenas a porção hexagonal das faces, não havendo tais poli linhas nos elementos triangulares.

Para a representação final do projeto não há a obrigatoriedade de se trabalhar com a malha completamente fechada, pois a estrutura do Projeto Éden está relacionada apenas com as arestas da sua malha. Porém, para operacionalizar as seções entre as malhas das esferas, faz-se necessário que a parte interna da malha tenha dados de informação. Com isso, utiliza-se o componente “*Close Mesh*” (*ClsMsh*) para fechar todas as aberturas (Figura AP 9 G). O resultado pode ser visto em perspectiva na Figura AP 9 C e comparado com a dupla camada de malha ainda hexagonal na Figura AP 9 B.

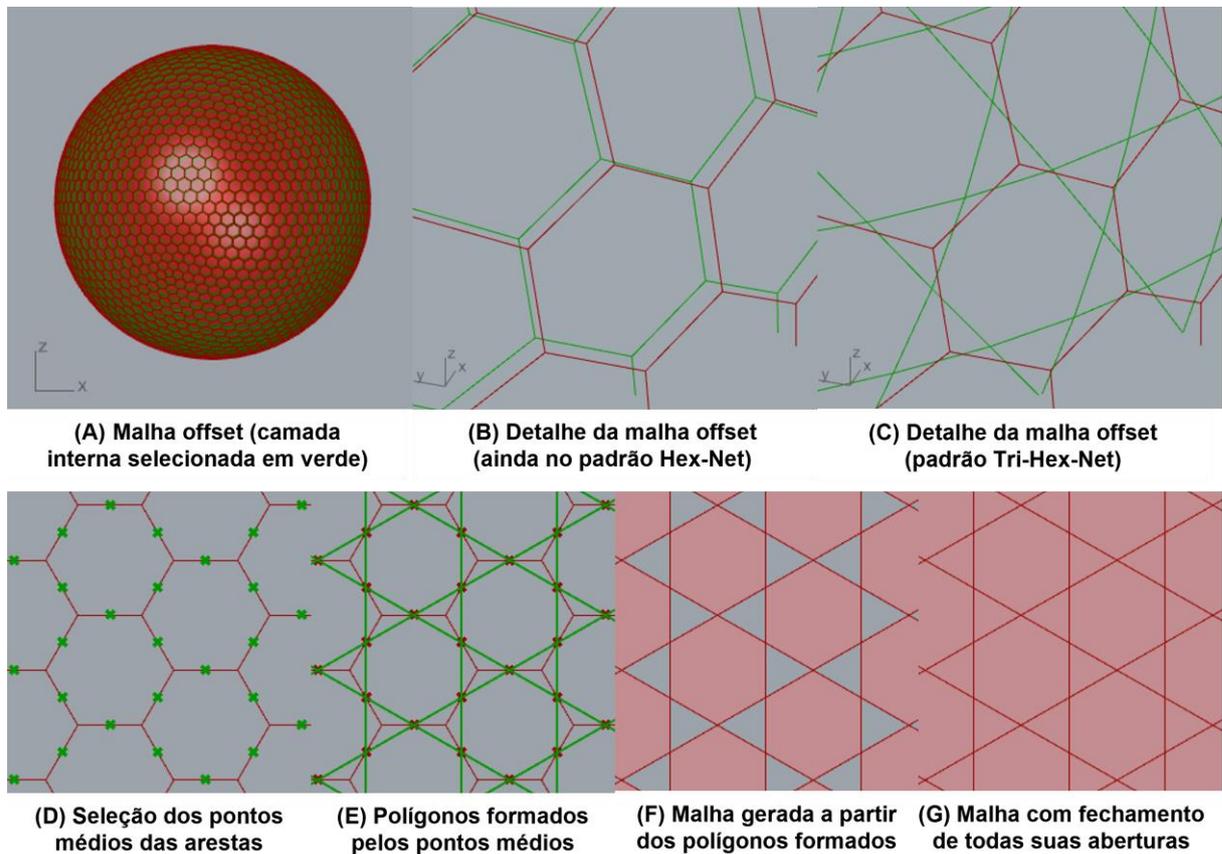


Figura AP 9 Representação gráfica da etapa 4 da modelagem do Projeto Éden.

Fonte: Elaboração própria.

Após o desenvolvimento da programação das malhas externa e interna de cada uma das geodésicas, representa-se as diagonais, responsáveis pela conexão entre as malhas. A Figura AP 10 apresenta a estrutura desenvolvida para a etapa 5, correspondente a esses elementos.

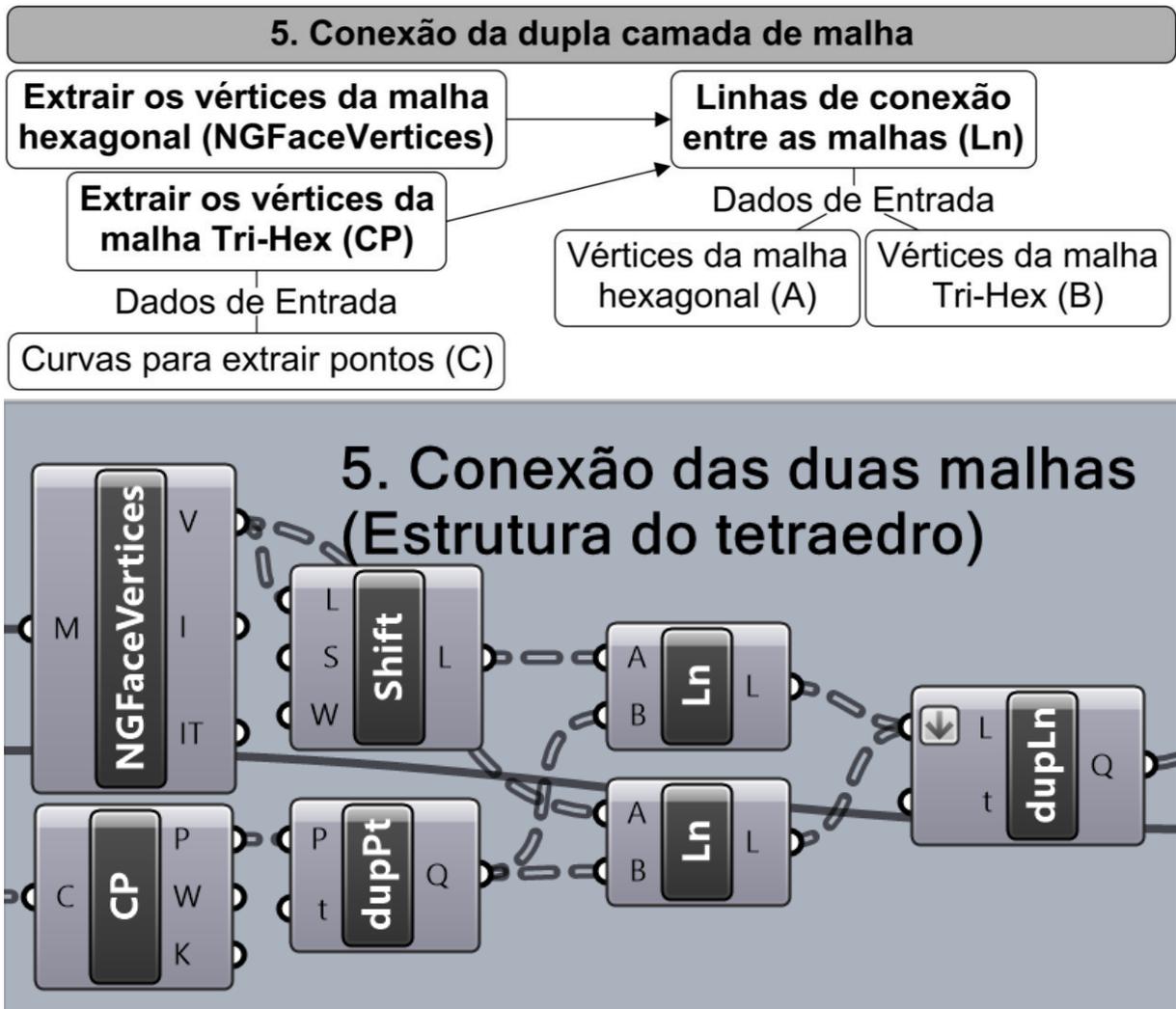


Figura AP 10 Esquema visual da etapa 5 da modelagem do Projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria.

São extraídos os pontos de controle dos polígonos que geram a malha da camada interna (Figura AP 11 A) e removidos os pontos duplicados, que se repetem no início e no final de cada polígono. Depois são extraídos os vértices da malha externa (Figura AP 11 B). E, após isso, são conectados os pontos entre as duas camadas (Figura AP 11 C). Devido a diferença de ordenamento dos vértices de alguns polígonos presentes nas duas malhas, algumas conexões acabam sendo geradas sobrepostas. Ou seja, diferentes vértices da malha interna acabam produzindo uma mesma conexão com um vértice da malha externa. Nesse sentido, outras conexões estão ausentes, pois foram geradas no sentido “errado”. Para solucionar a falta dessas arestas, as conexões são geradas em dois sentidos, entre pontos anteriores e posteriores da segunda malha. Porém, agora existem diagonais repetidas. Para isso, é inserido o componente “*removeDuplicateLines*” (*dupLn*) que remove as arestas duplicadas.

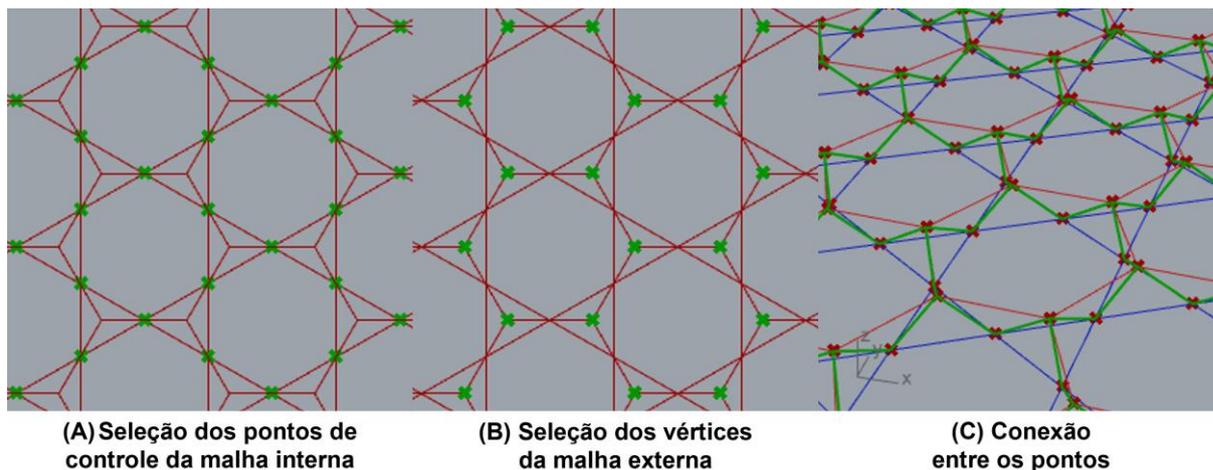


Figura AP 11 Representação gráfica da etapa 5 da modelagem do Projeto Éden.

Fonte: Elaboração própria.

A intersecção dos domos, na etapa 6 (Figura AP 12), é subdividida em grupos para cada uma das camadas, pois são utilizadas técnicas diferentes de acordo com o tipo de modelo geométrico, se malha ou arestas. Para as etapas 6.1 e 6.3, que tratam respectivamente das camadas externas e internas, por estarem configuradas como malhas, elas podem ser separadas utilizando-se das suas malhas equivalentes adjacentes. Ou seja, uma malha é utilizada para cortar a outra, através do componente “*Mesh Split*” (*MSplit*). Com isso, o resultado são duas porções de malhas geodésicas: aquela que faz parte do projeto (porção selecionada) e aquela subtraída (que invadiu a geodésica subsequente)

Já na camada de diagonais, que engloba os elementos de conexão das duas malhas e integra a etapa 6.2, por se tratar de um conjunto de arestas, não é possível cortar seus elementos a partir de uma malha. Então, utiliza-se o componente “*Trim with Brep*” (*Trim*), que estabelece uma superfície limite (definindo o que é interior e exterior) para cortar as arestas que o atravessam e também separar os elementos que se encontram dentro e fora desse volume. Nesse sentido, utilizam-se as circunferas (esferas utilizadas no processo de modelagem das geodésicas) como geometria de recorte. E, assim como anteriormente, o resultado são dois conjuntos: arestas que integram o projeto e aquelas subtraídas.

A Figura AP 12 é referente à programação das geodésicas B e C, que são aquelas que possuem duas interseções. Nesses dois casos as geodésicas interseccionam duas esferas, uma anterior e uma posterior, por isso há a repetição dos componentes *MSplit* para as camadas de malha e *Trim* no conjunto de diagonais. Para a geodésica A (que só faz a interseção com a geodésica B) e para a

geodésica D (que só faz interseção com a geodésica C) a programação é reduzida, uma vez que se resume a um componente em cada etapa (6.1, 6.2 e 6.3).

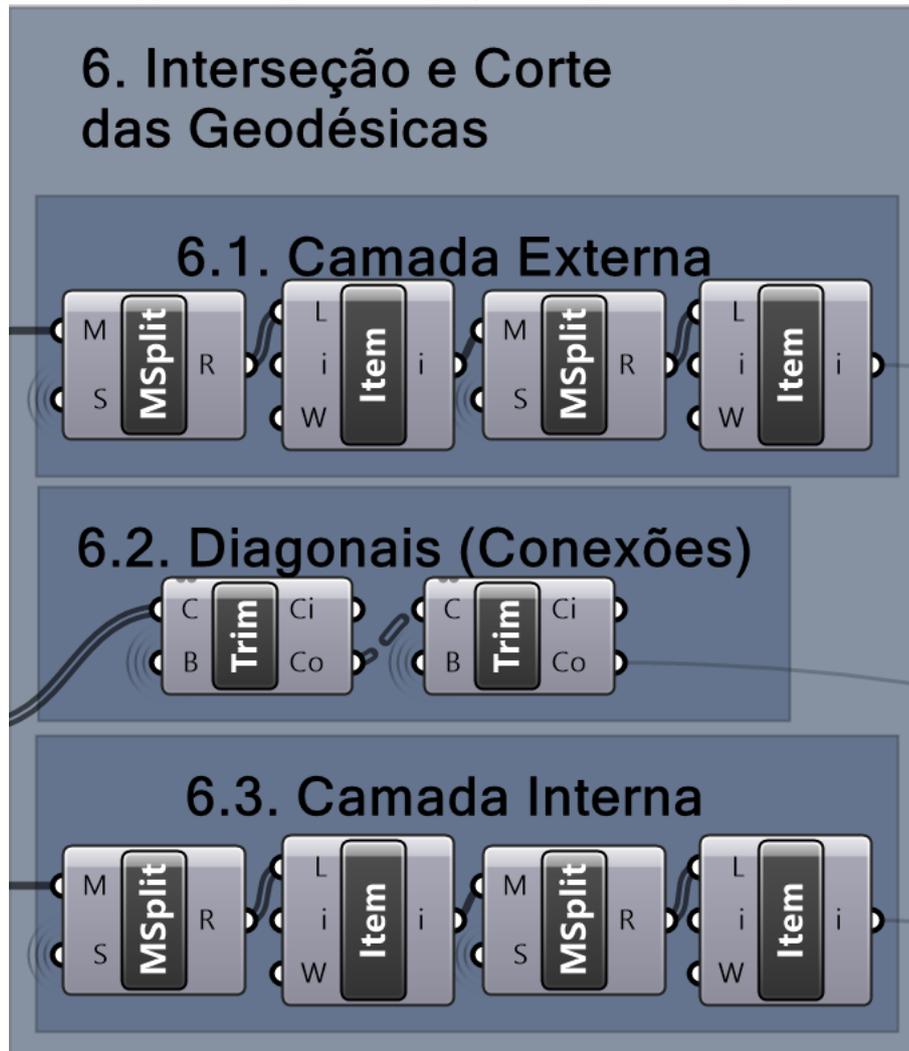
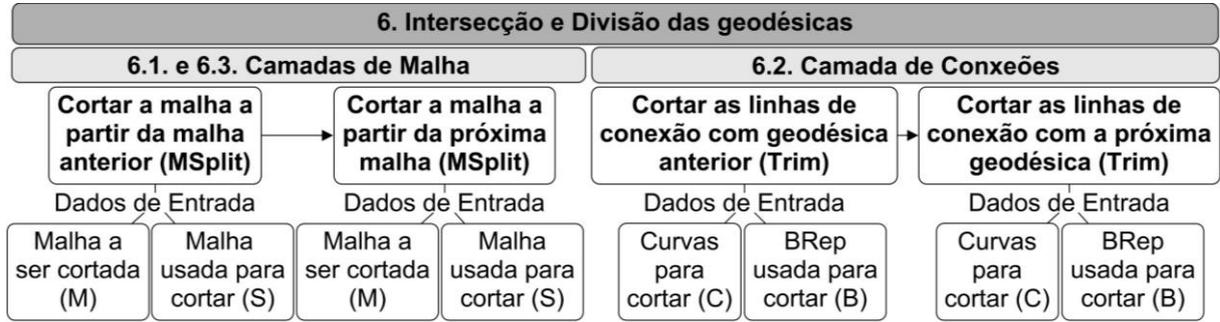


Figura AP 12 Esquema visual da etapa 6 da modelagem do Projeto Éden.
 Fonte: Elaboração própria

Na Figura AP 13 está representado o modelo resultante da etapa 6, apenas para a malha externa, para manter a clareza visual e facilitar a compreensão do processo. A Figura AP 13 A ilustra cada uma das geodésicas afastadas uma da outra, com a marcação na cor verde das porções que são mantidas após o processo

de combinação das geodésicas e na cor vermelha as porções que são subtraídas da composição final. Na Figura AP 13 B estão representadas apenas as porções utilizadas no projeto, afastadas uma das outras. Como resultado desta etapa, tem-se um agrupamento de geodésicas similar ao de bolhas de sabão (Figura AP 13 C).

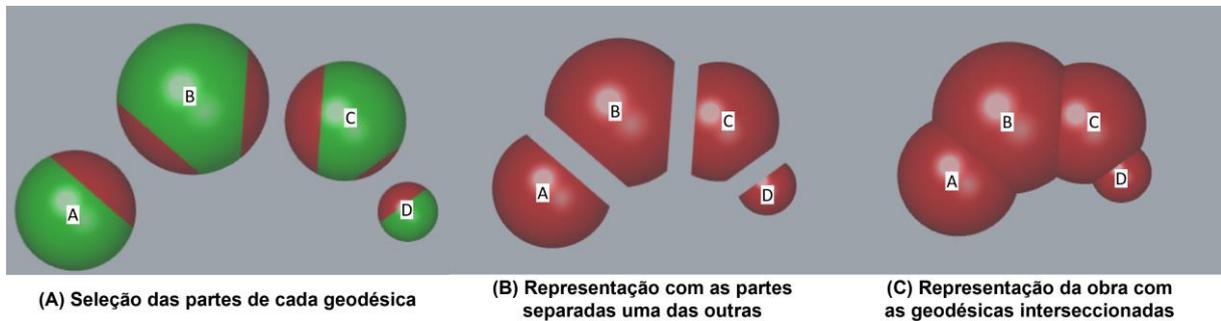


Figura AP 13 Representação gráfica da etapa 6 da modelagem do Projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria.

Na sequência, configurou-se o modelo para representar também a adaptação da estrutura ao terreno. Para isso, buscou-se interseccionar o modelo com uma superfície curva (representando o terreno). Como não se encontrou material com levantamento topográfico do terreno, o objetivo dessa etapa foi apenas demonstrar a versatilidade da geometria da geodésica em se adaptar a qualquer superfície, visto que essa propriedade representou um papel importante no Projeto Éden. Então, a etapa 7, presente na Figura AP 14, envolve a modelagem do terreno (etapa 7.1) e a adaptação das geodésicas e de cada uma de suas camadas estruturais à essa superfície (etapas 7.2, 7.3 e 7.4).

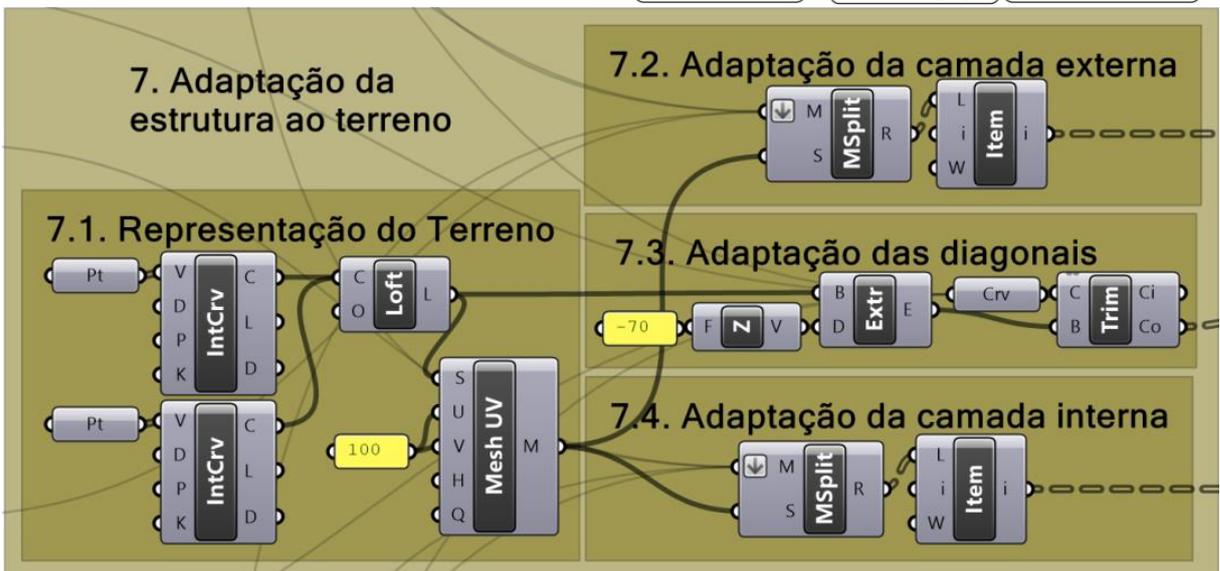
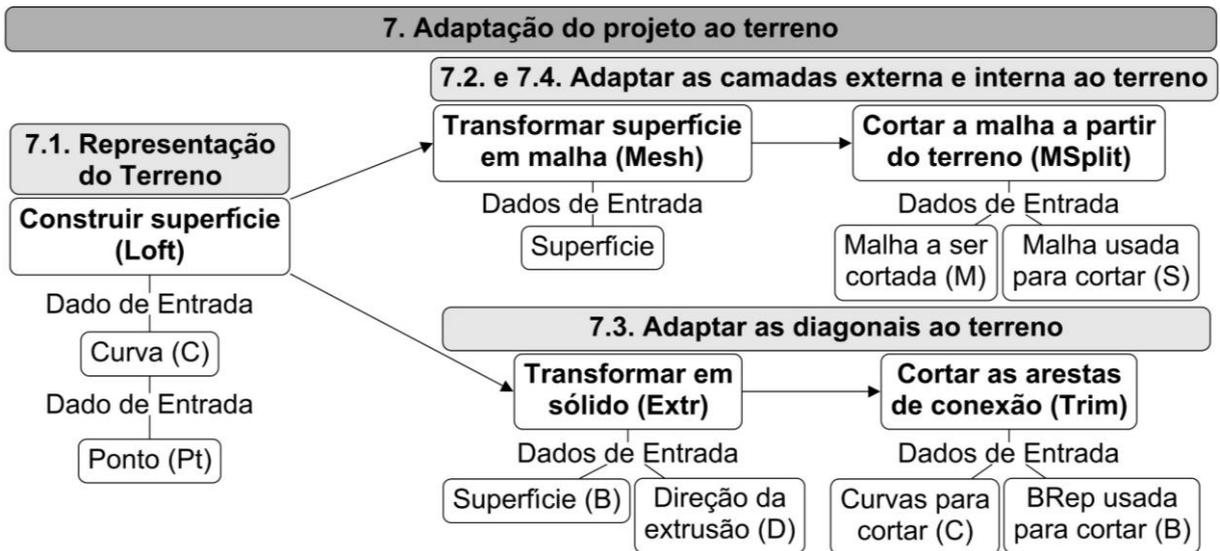


Figura AP 14 Esquema visual da etapa 7 da modelagem do Projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria.

Para definir o terreno, inicia-se pela inserção de dois conjuntos de pontos no próprio *Rhino* (que representam duas bordas paralelas do terreno), para que seus lugares geométricos sejam definidos visualmente. Estes pontos são referenciados e internalizados no *Grasshopper*. Na sequência, geram-se duas linhas curvas, interpoladas (*IntCrv*). Estas curvas serão as geratrizes de uma superfície de varredura, representada a partir da técnica “*Loft*” (etapa 7.1) na Figura AP 15 A.

Além disso, também foi necessário gerar um modelo de malha correspondente ao modelo da superfície do terreno. Tecnicamente, aplica-se o componente “*Mesh Surface*” (*Mesh UV*), que transforma a superfície em uma malha por meio da sua divisão em dois sentidos, U e V. Adotam-se valores de divisão (100) relativamente elevados (quando comparado ao valor padrão de 5, pré-estabelecido

no componente) devido às dimensões do projeto, para garantir que a subdivisão da malha se aproxime da curvatura da superfície original.

Para representar a adaptação das geodésicas ao terreno, corta-se cada uma das camadas a partir da malha que representa o terreno. Então, as etapas 7.2 e 7.4 referem-se à programação do recorte das malhas externas e internas, empregando-se o mesmo componente utilizado na etapa anterior (6), “*MSplit*”.

Na etapa 7.3, referente ao recorte das diagonais de conexão entre as camadas, foi necessário transformar o terreno em um sólido a partir de uma extrusão (Extr) no eixo Z com direção negativa. Isso para ser possível operacionalizar o processo compositivo entre a superfície e as arestas a partir da técnica *Trim* (aparar), que necessita de um sólido para que possa ser feito o corte e seleção das arestas. Para garantir que haja o recorte, foi necessário um valor maior que todos os raios das geodésicas, neste caso, foi atribuído o valor “-70”, garantindo que o sólido criado envolva toda porção “enterrada” das geodésicas. O volume criado a partir da superfície que representa o terreno irá recortar as arestas a partir do componente “*Trim with Brep*” (*Trim*), separando as porções que ficam localizadas no interior (removidas) e exterior (selecionadas).

Assim, são obtidos os dados necessários para o recorte das malhas, resultando apenas as porções visíveis sob o solo (Figura AP 15 C). A Figura AP 15 representa o processo de adaptação ao terreno, adotado em todas as camadas do projeto, embora só seja possível a visualização da camada externa do modelo.

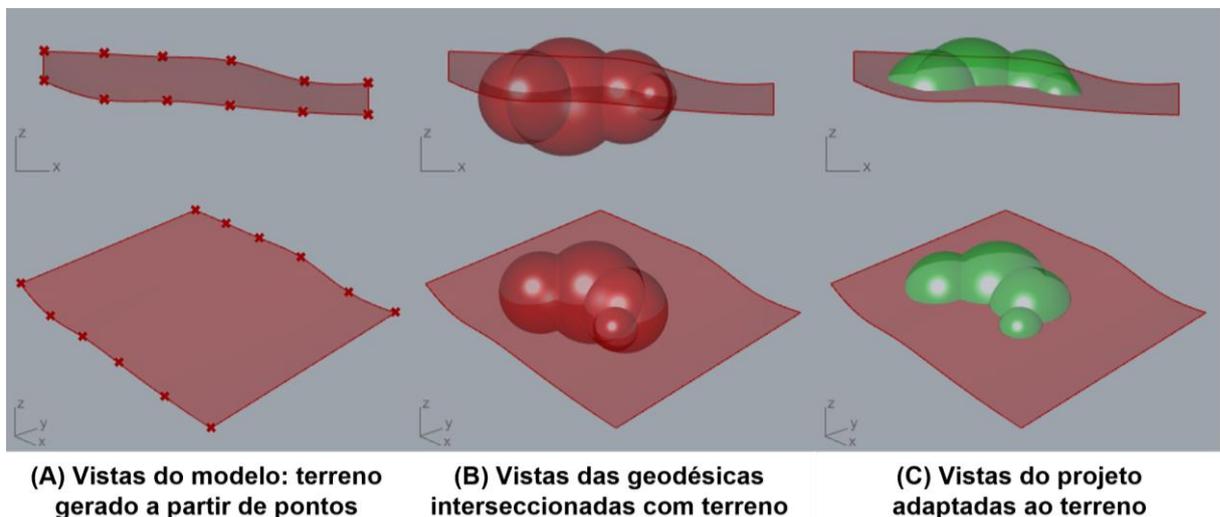


Figura AP 15 Representação gráfica da etapa 7 da modelagem do Projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria.

Segundo Pottmann et al (2007), a malha em meio digital é apenas uma abstração da malha presente na edificação. Isso porque seus elementos (pontos, arestas e faces) não possuem espessuras quando abordadas nos modelos computacionais. Dessa forma, faz-se necessário aproximar, visualmente, a representação abstrata daquela presente na construção. A última parte da programação, etapa 8 (Figura AP 16), apresenta a seleção das arestas das três camadas e a modelagem de uma superfície cilíndrica ao redor dessas linhas, visando representar uma estrutura tubular.

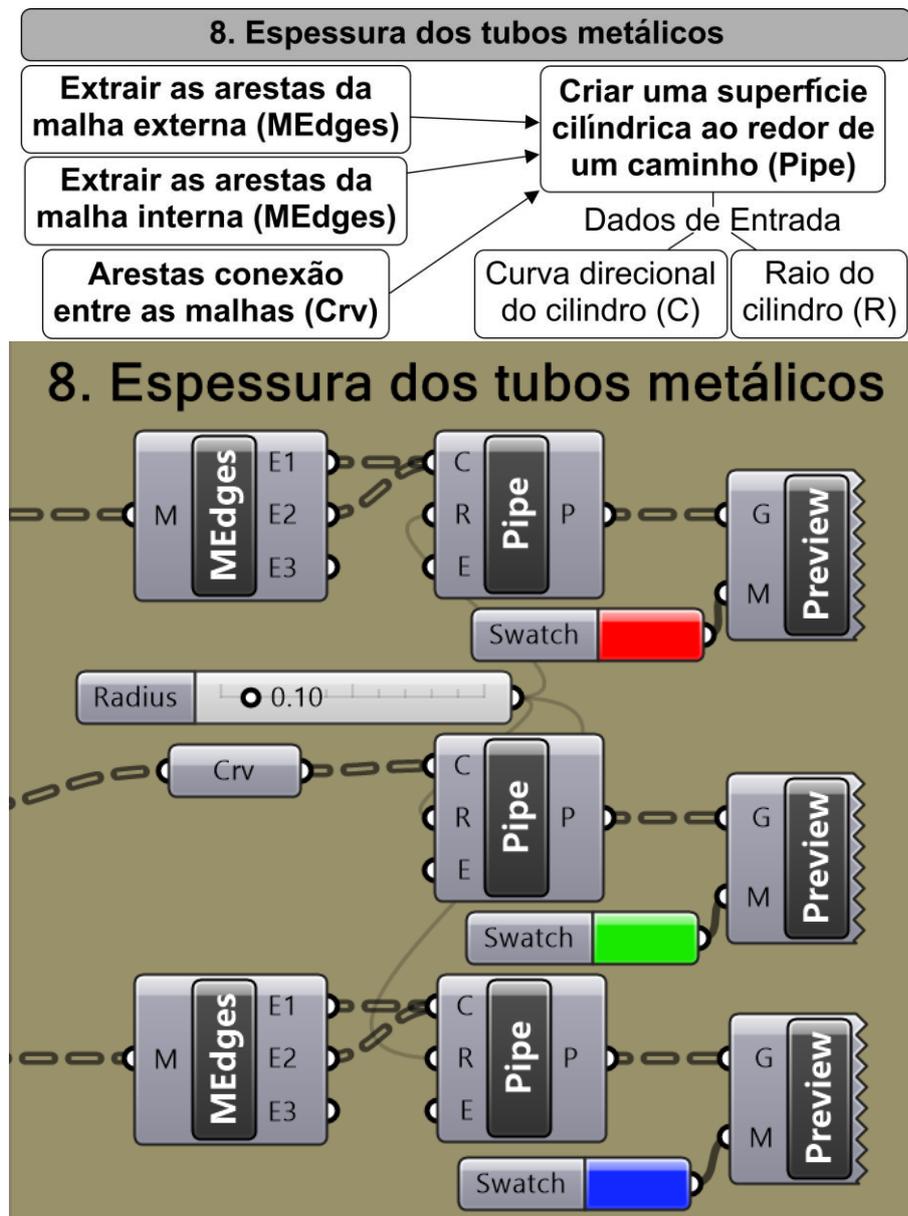


Figura AP 16 Esquema visual da etapa 8 da modelagem do Projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria

Para isso, extrai-se as arestas da dupla camada de malha por meio do componente “*Mesh Edges*” (*MEdges*), enquanto as diagonais são apenas selecionadas com o parâmetro de curva (*Crv*). Então as linhas de cada uma das camadas são inseridas no componente “*Pipe*” a fim de modelar uma espessura para as arestas. Para este mesmo componente, também é necessário inserir o valor do raio dos elementos criados. E aqui adota-se o valor de “0.1” (equivalente à 100mm), pois segundo Larsen e Ryas (2016) o diâmetro das peças dessa estrutura é de 200mm. Por fim, o componente de visualização “*Preview*” insere uma cor diferente para cada um dos grupos de elementos (camada externa, interna e conexão entre as camadas).

A Figura AP 17 ilustra, respectivamente: (A) um detalhe da estrutura vista de cima, (B) o modelo em perspectiva e (C) um detalhe das malhas em perspectiva. Em vermelho está destacada a malha externa, com o padrão hexagonal; em azul a malha interna Tri-Hex; e em verde as diagonais, arestas de conexão.

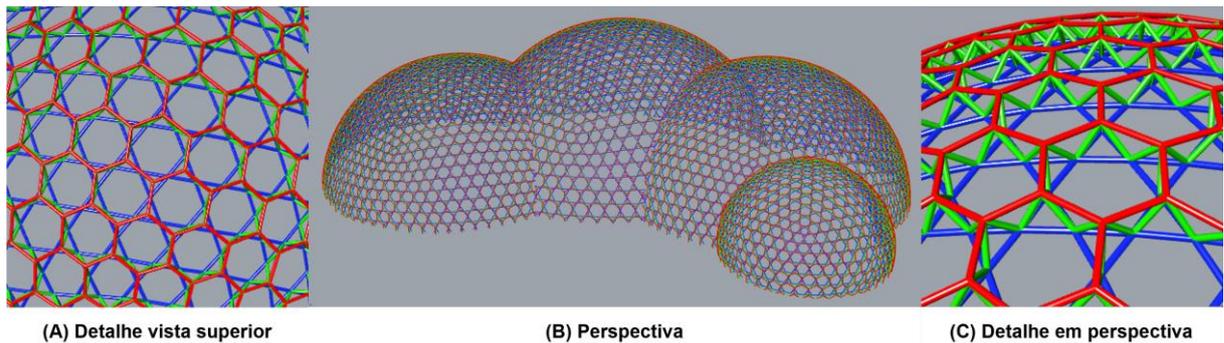


Figura AP 17 Representação gráfica da etapa 8 da modelagem do Projeto Éden.
Fonte: Elaboração própria.

Apêndice B - Modelagem das células de Weaire-Phelan

Os esquemas visuais a seguir sistematizam as etapas de modelagem a partir dos conceitos geométricos empregados para o tetrakaidecaedro (estrutura de saber e programação na Figura AP 18 e modelos resultantes da representação gráfica na Figura AP 19) e para o dodecaedro irregular (estrutura de saber na Figura AP 20 e modelos resultantes da representação gráfica na Figura AP 21).

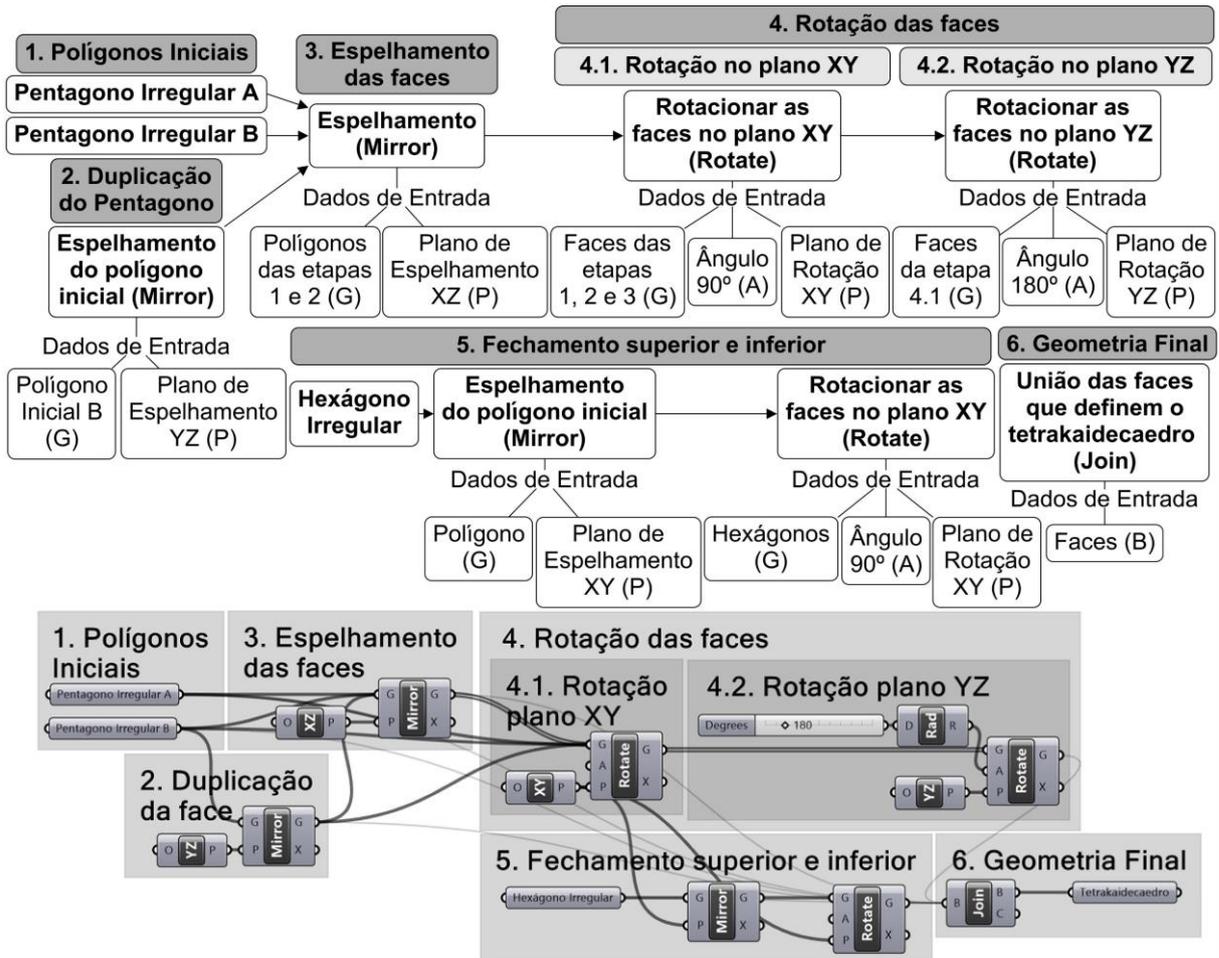


Figura AP 18 Esquema visual de obtenção do tetrakaidecaedro a partir das transformações geométricas aplicadas em uma das faces.

Fonte: Elaboração própria.

A programação para o desenvolvimento da modelagem a partir das transformações geométricas possui como ponto de partida as faces obtidas na modelagem a partir dos vértices. Para o tetrakaidecaedro, o conjunto de faces que se repete é um agrupamento de três pentágonos, com dois polígonos irregulares distintos e o espelhamento do menor deles (Figura AP 19 A, B, C, D e E). Essa estrutura, então, é rotada em 180° tendo como base o plano XY e, conseqüentemente, duplicada no processo (Figura AP 19 F e G).

Novamente, todas as faces são rotadas no plano XY, agora em 90° . Porém, como pode ser visto na Figura AP 19 H, apenas essa rotação não é suficiente para o encaixe das novas faces. Faz-se necessário rotar mais uma vez (em 180°), agora se utilizando como base o plano YZ (Figura AP 19 I). Por fim, o fechamento do poliedro é feito a partir do hexágono irregular localizado tanto na parte inferior quanto na superior. O primeiro é inserido como uma nova geometria/face, enquanto o segundo é resultado de uma transformação por espelhamento (reflexão) e rotação.

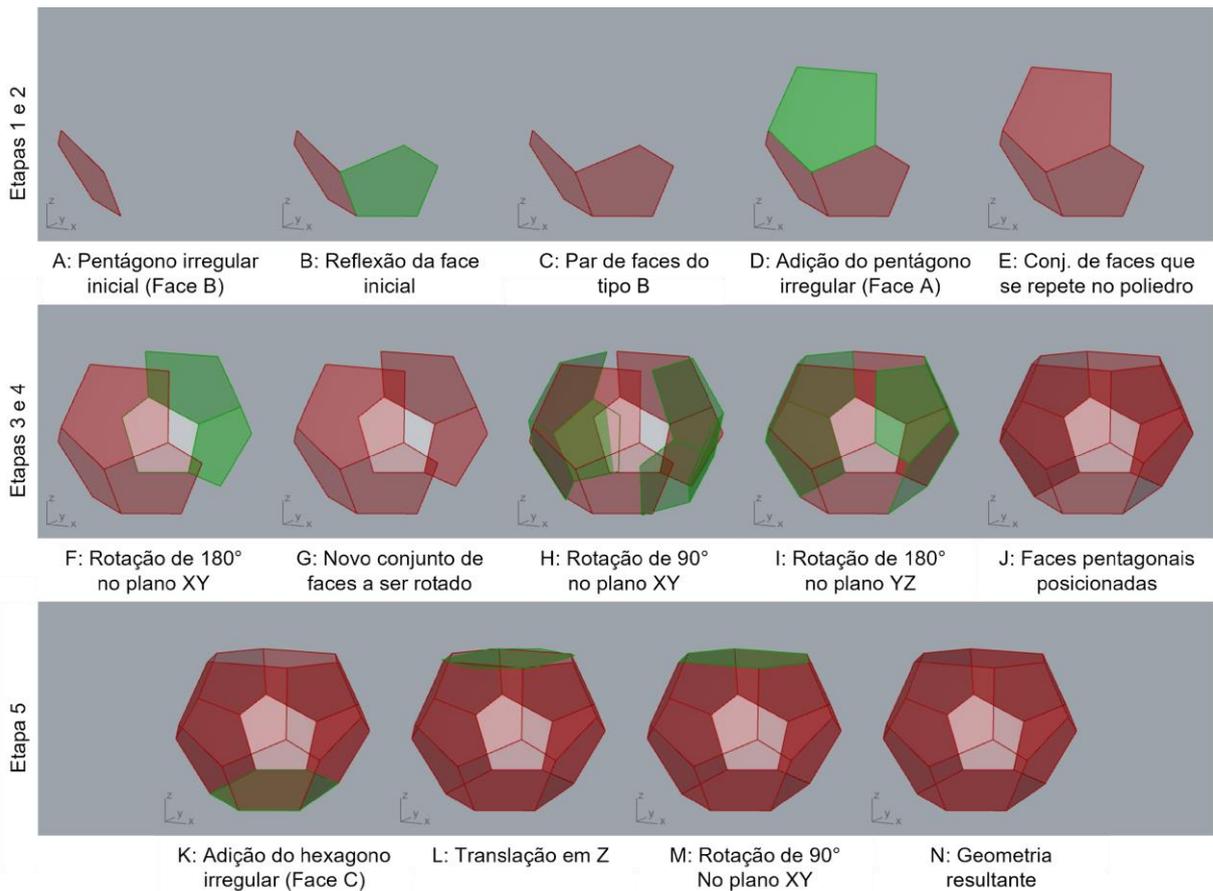


Figura AP 19 Representação gráfica da modelagem do tetrakaidecaedro a partir das transformações geométricas aplicadas em uma das faces.

Fonte: Elaboração própria.

O processo de modelagem do dodecaedro irregular possui uma estrutura similar àquela utilizada para configurar o tetrakaidecaedro. A Figura AP 20 e a Figura AP 21 ilustram os mesmos processos, mas aplicados para definir a geometria específica do dodecaedro irregular.

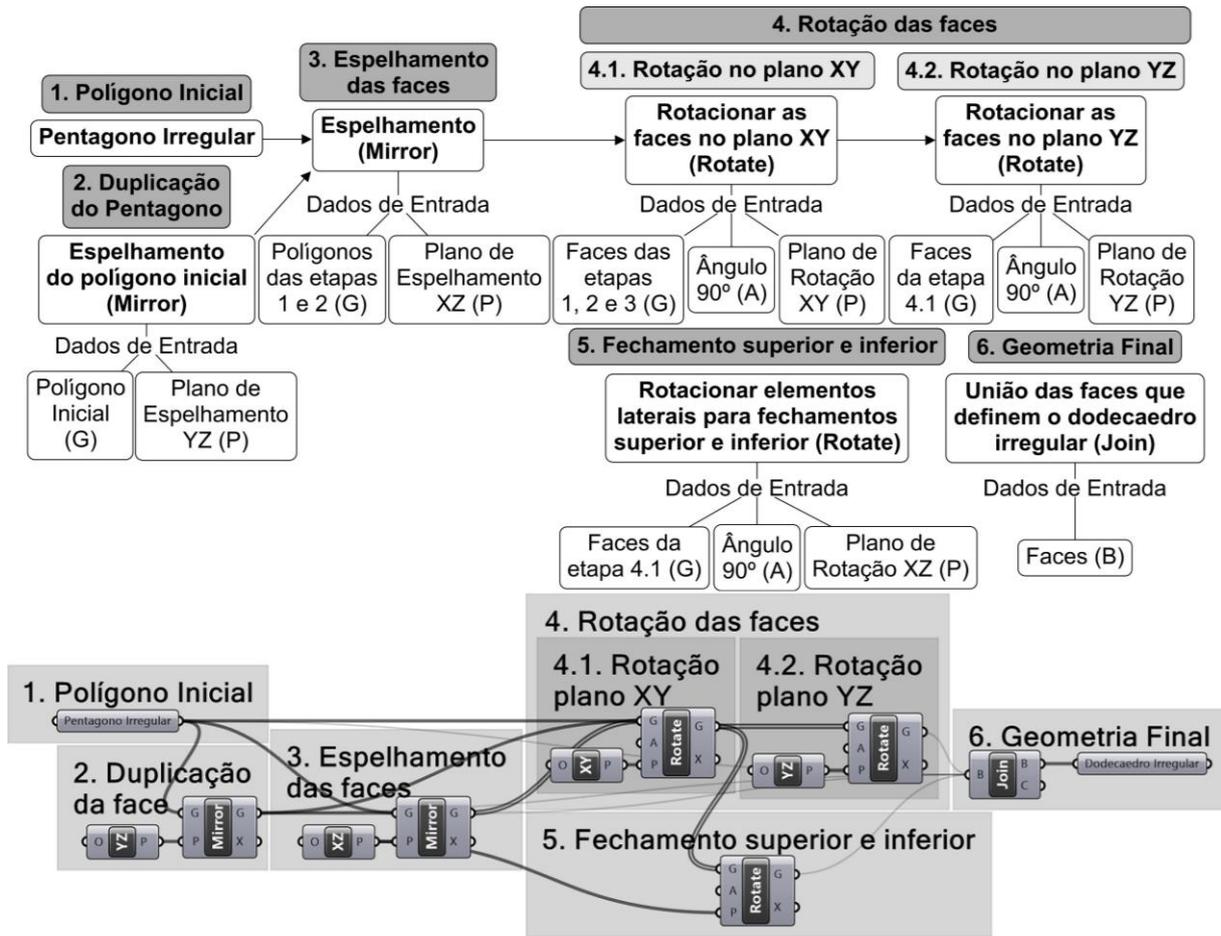


Figura AP 20 Esquema visual de obtenção do dodecaedro irregular a partir das transformações geométricas.
 Fonte: Elaboração própria.

Os procedimentos utilizados para gerar, por meio de simetrias, o tetrakaidecaedro e o dodecaedro, são semelhantes, com variação das faces utilizadas durante o processo. No caso do dodecaedro, o ponto de partida é o pentágono irregular compartilhado com o tetrakaidecaedro. Há a duplicação desta face pentagonal a partir do seu espelhamento (Figura AP 21 B) e rotação em 180° no plano XY (Figura AP 21 D e E). Depois é aplicada outra rotação da composição no mesmo plano (Figura AP 21 F), com um ângulo de 90°, mas que não é suficiente para que haja o encaixe com o modelo até então construído (Figura AP 21 F), sendo necessário aplicar uma segunda rotação nesse agrupamento, agora no plano YZ e com ângulo de 90° (Figura AP 21 G e H).

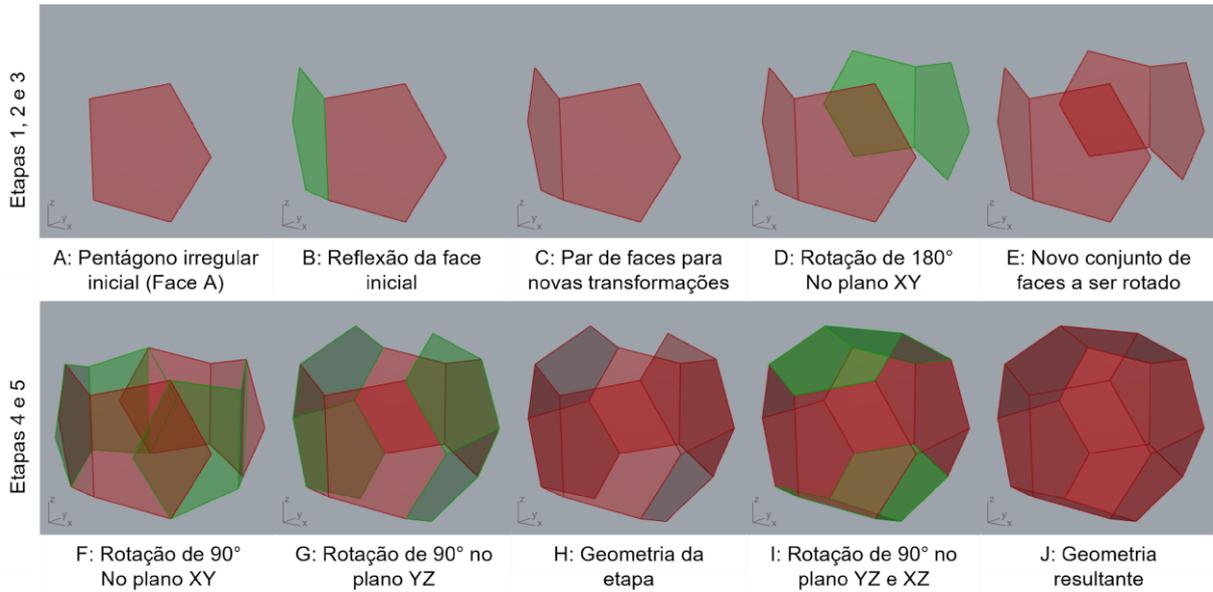


Figura AP 21 Representação gráfica da modelagem do dodecaedro irregular a partir das transformações geométricas.

Fonte: Elaboração própria.

Como consequência de o poliedro ser constituído exclusivamente por um único polígono, a geometria utilizada para o fechamento superior e inferior difere daquela utilizada no processo do tetrakaidecaedro, que utiliza a face hexagonal irregular para esse fim. O fechamento do dodecaedro irregular é alcançado por meio de uma rotação adicional de 90° no plano XZ, aplicada na única face que o compõe (Figura AP 21 F e Figura AP 21 I). O resultado final da modelagem pode ser visualizado na Figura AP 21 J.

Apêndice C – Modelagem da estrutura (espuma) de Weaire-Phelan

A modelagem da espuma de Weaire-Phelan parte da definição das duas células base modeladas anteriormente, o tetrakaidecaedro e o dodecaedro irregular. Como já foi desenvolvida a programação dessas estruturas para a etapa 1, os modelos foram referenciados, conforme o esquema visual da Figura AP 22. As células referenciadas estão ilustradas na Figura AP 23.

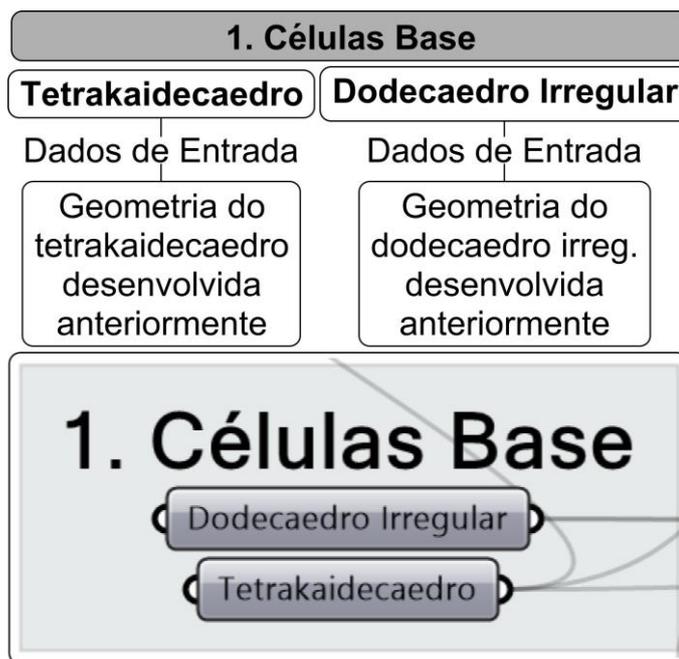


Figura AP 22 Esquema visual da etapa 1 da modelagem do modelo de WP.
Fonte: Elaboração própria.

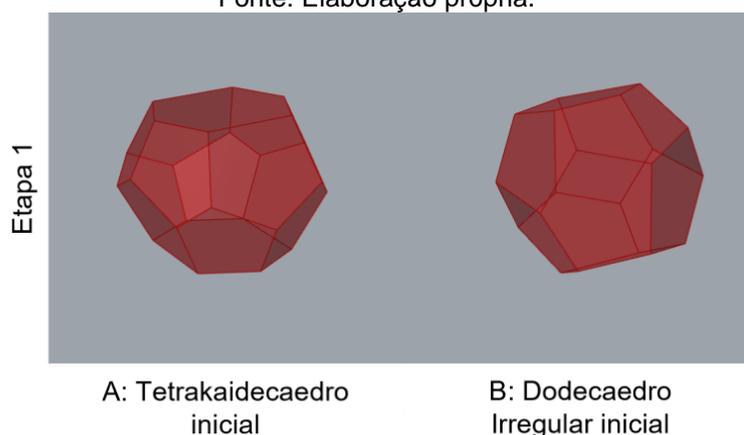


Figura AP 23 Representação gráfica da etapa 1 do modelo de WP.
Fonte: Elaboração própria.

O referenciamento das geometrias é feito a partir de um elemento de programação do tipo parâmetro, denominado “geometria”. Após, elas estão internalizadas nesses componentes porque não há a necessidade de ter a programação desses elementos junto ao arquivo, considerando-se que estas

geometrias não terão seus parâmetros modificados durante as próximas etapas da modelagem.

Na etapa 2 (Figura AP 24) definem-se os conceitos e as transformações geométricas necessárias para a estruturação do primeiro par de tetrakaidecaedros. Primeiro é estabelecida a geometria de referência, na etapa 2.1 (Figura AP 25 A), e depois aplicada a reflexão no plano XY desta geometria (Figura AP 25 B).

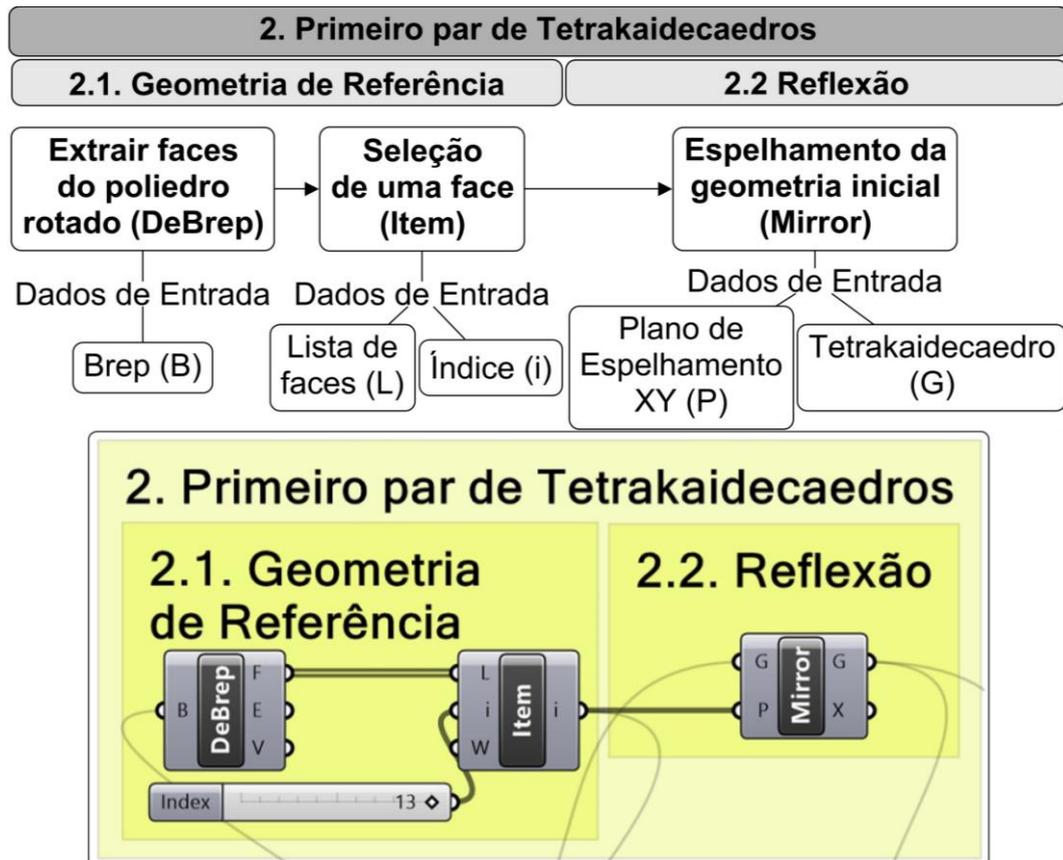


Figura AP 24 Esquema visual da etapa 2 da modelagem do modelo de WP.
Fonte: Elaboração própria.

Nesta etapa 2, obtém-se um segundo poliedro, espelhado em relação ao primeiro. Para isso, na etapa 2.1 se estabelece a geometria de referência em que se extrai o conjunto de faces (*DeBrep*) visando selecionar o hexágono superior (Figura AP 25 A), como um item de uma lista. Depois o processo de reflexão propriamente dito (etapa 2.2) ocorre por meio do componente de espelhamento (*Mirror*), cujos dados de entrada são a geometria do poliedro a ser espelhada (G) e um plano para que ocorra o espelhamento (P). Define-se o ponto de origem deste plano a partir da seleção da face superior do hexágono irregular da célula, pois este polígono coincide com o plano de espelhamento (um plano XY deslocado no eixo Z).

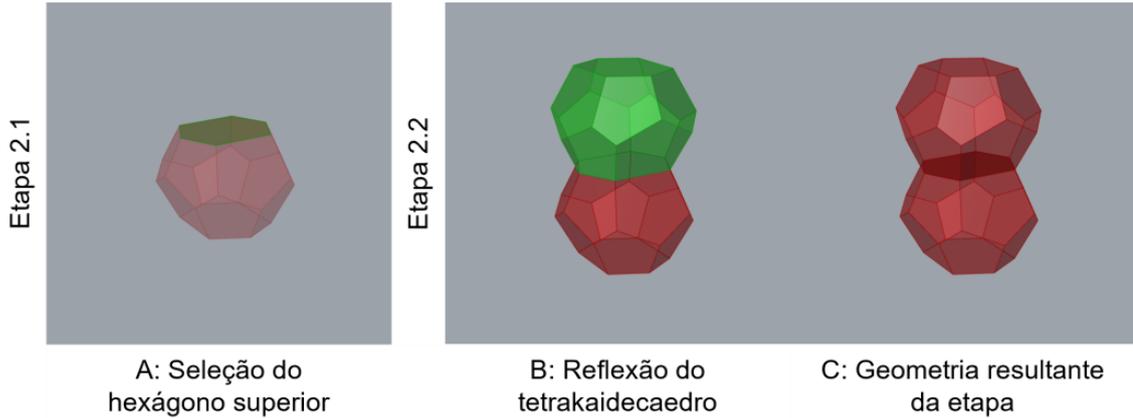


Figura AP 25 Representação gráfica da etapa 2 do modelo de WP.
 Fonte: Elaboração própria.

Por sua vez, a etapa 3 (Figura AP 26) é referente ao segundo par de tetrakaidecaedros. Este par no modelo de WP se encontra alinhado com o eixo horizontal Y, por isso é necessário aplicar uma rotação do primeiro par no eixo Z (etapa 3.1) e, após, uma translação (etapa 3.2 para que possa haver a justaposição de suas faces com as do par anterior.

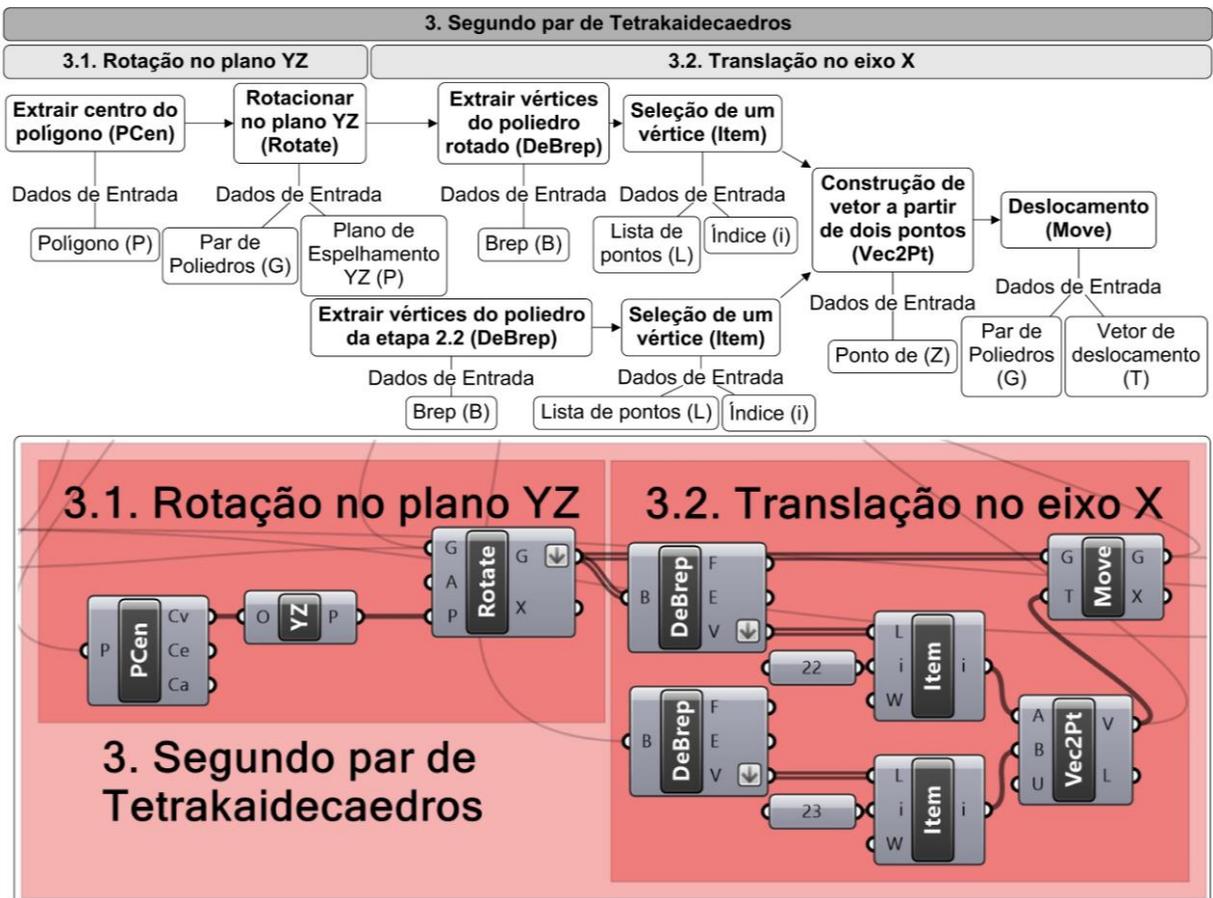


Figura AP 26 Esquema visual da etapa 3 da modelagem do modelo de WP.
 Fonte: Elaboração própria.

Para a rotação (*Rotate*) é necessário informar a geometria base (G), o ângulo de rotação (A) e o plano de rotação (P). O ângulo é 90° , valor padrão automaticamente atribuído no componente de rotação e o plano é definido em YZ, com origem no centro do hexágono irregular superior (*PCen*), em realce na Figura AP 27 A. Este plano representa um dos eixos de simetria do tetrakaidecaedro. Na Figura AP 27 B está ilustrado o resultado dessa rotação.

Para que este par de tetrakaidecaedros se justaponha nas faces de tipo B (pentágono irregular menor) do primeiro par, é necessário aplicar uma translação, por meio do componente de deslocamento (*Move*). O vetor de deslocamento (T), que define o componente, é atribuído a partir de dois pontos: o ponto que representa a posição inicial (no encontro dos tetrakaidecaedros do segundo par, Figura AP 27 D) e o ponto que representa a posição final (no encontro dos tetrakaidecaedros do primeiro par, Figura AP 27 E). Para isso, é utilizado o componente de seleção de itens (*Item*), com índices 23 e 22, a partir da decomposição de cada um dos pares de poliedros (*DeBrep*). Este vetor (*Vec2Pt*) informa a direção para o componente de deslocamento, cuja transformação está ilustrada na Figura AP 27 F.

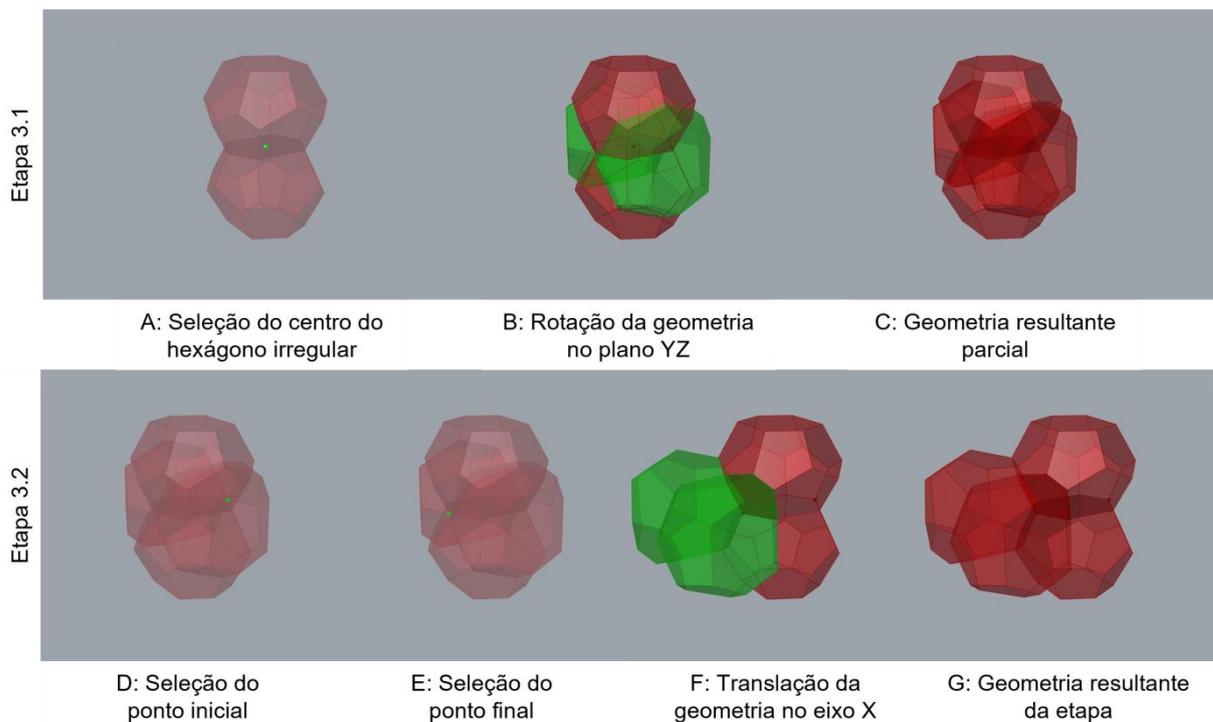


Figura AP 27 Representação gráfica da etapa 3 do modelo de WP.

Fonte: Elaboração própria.

O terceiro, e último, par de tetrakaidecaedros está descrito no esquema visual da etapa 4 (Figura AP 28). E da mesma maneira como na etapa anterior, possui

uma sub etapa para a rotação (etapa 4.1) e outra para a translação (etapa 4.2). Nessa parte da programação ficam definidos os tetrakaidecaedros cujas faces hexagonais são perpendiculares ao eixo X.

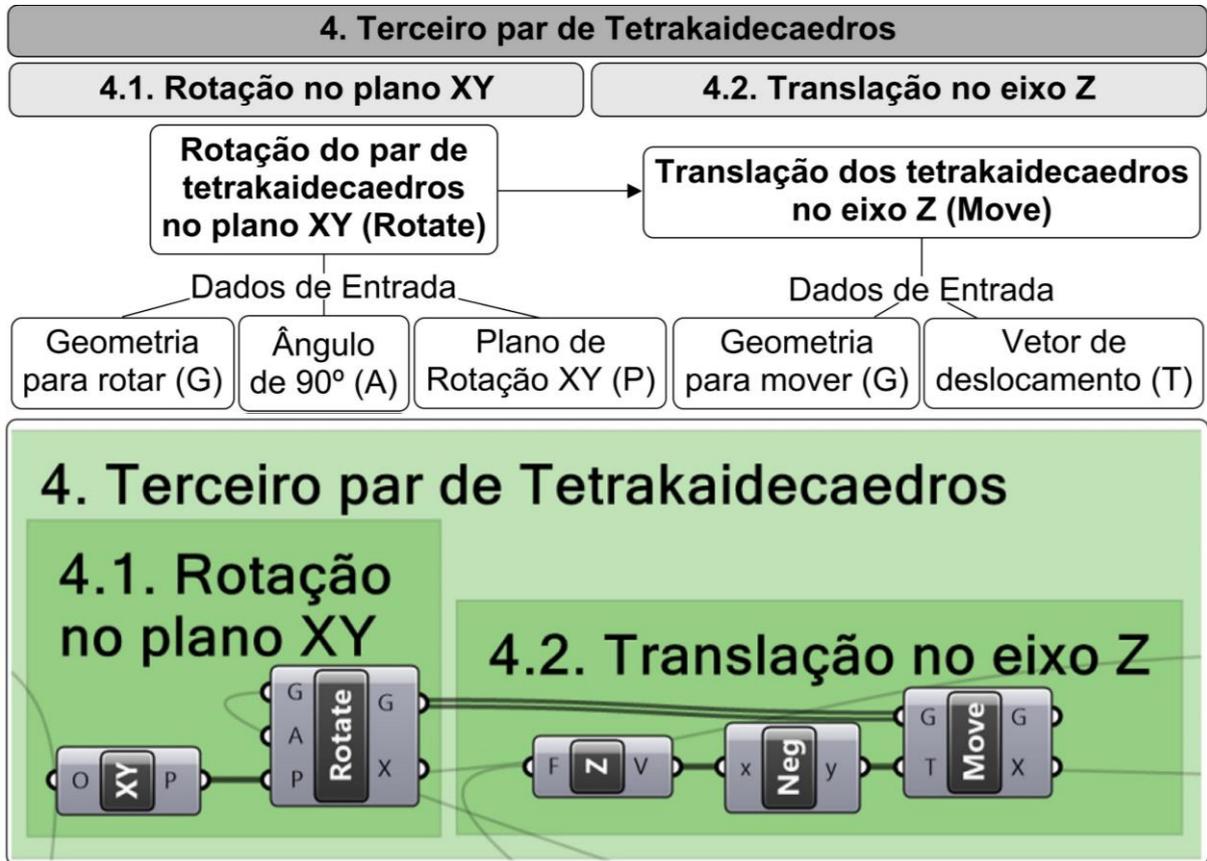


Figura AP 28 Esquema visual da etapa 4 da modelagem do modelo de WP.

Fonte: Elaboração própria.

Na etapa 4.1 é aplicada a rotação no plano XY. Para isso, utiliza-se o componente *Rotate*, definindo os planos e os ângulos de rotação. Novamente o ângulo adotado é o de 90°, já previamente atribuído como padrão no dado de entrada (A) do componente de rotação. Já o plano de rotação estabelecido é o XY, com sua origem no centro do primeiro tetrakaidecaedro (etapa 1), pois o par a ser gerado na etapa 4 é produto de uma rotação em torno do primeiro par (cujo eixo do par está no eixo Z). O resultado dessa rotação pode ser visto na Figura AP 29 A. Enquanto isso, a etapa 4.2 está ilustrada na Figura AP 29 B e caracteriza a translação no eixo Z. O componente de deslocamento (*Move*) possui como dados de entrada a geometria a ser transladada (G) e o vetor de deslocamento (T), cujo valor absoluto é o mesmo da etapa 3.2, sendo necessário ajustar para o eixo Z e corrigir o sentido (*Neg*).

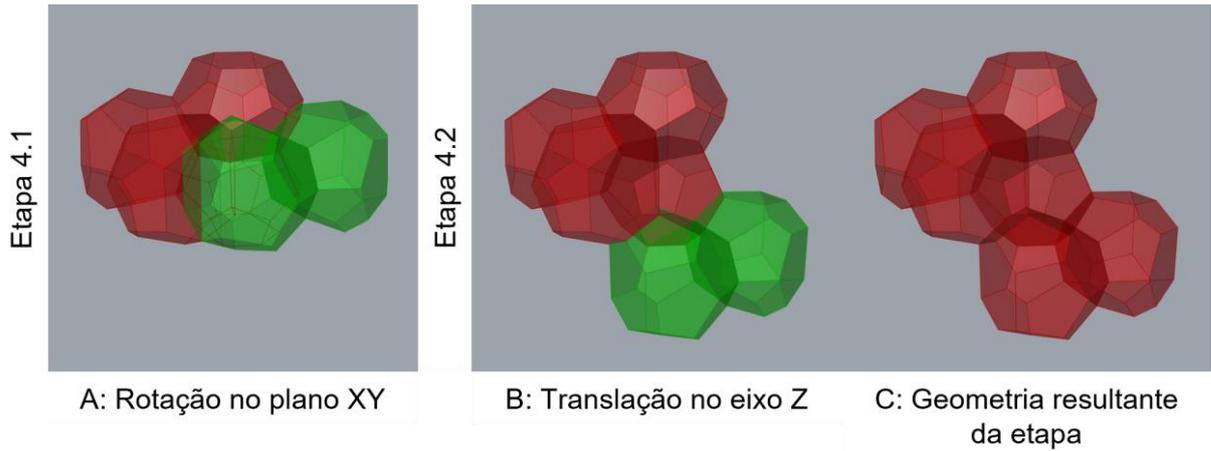


Figura AP 29 Representação gráfica da etapa 4 do modelo de WP.
 Fonte: Elaboração própria.

Até esse momento foram gerados todos os tetrakaidecaedros do modelo de Weaire-Phelan. Então, parte-se para a modelagem das células referentes aos dodecaedros irregulares. Na etapa 5 (Figura AP 30) está o esquema visual que define as transformações necessárias para o posicionamento do primeiro dodecaedro no modelo da espuma.

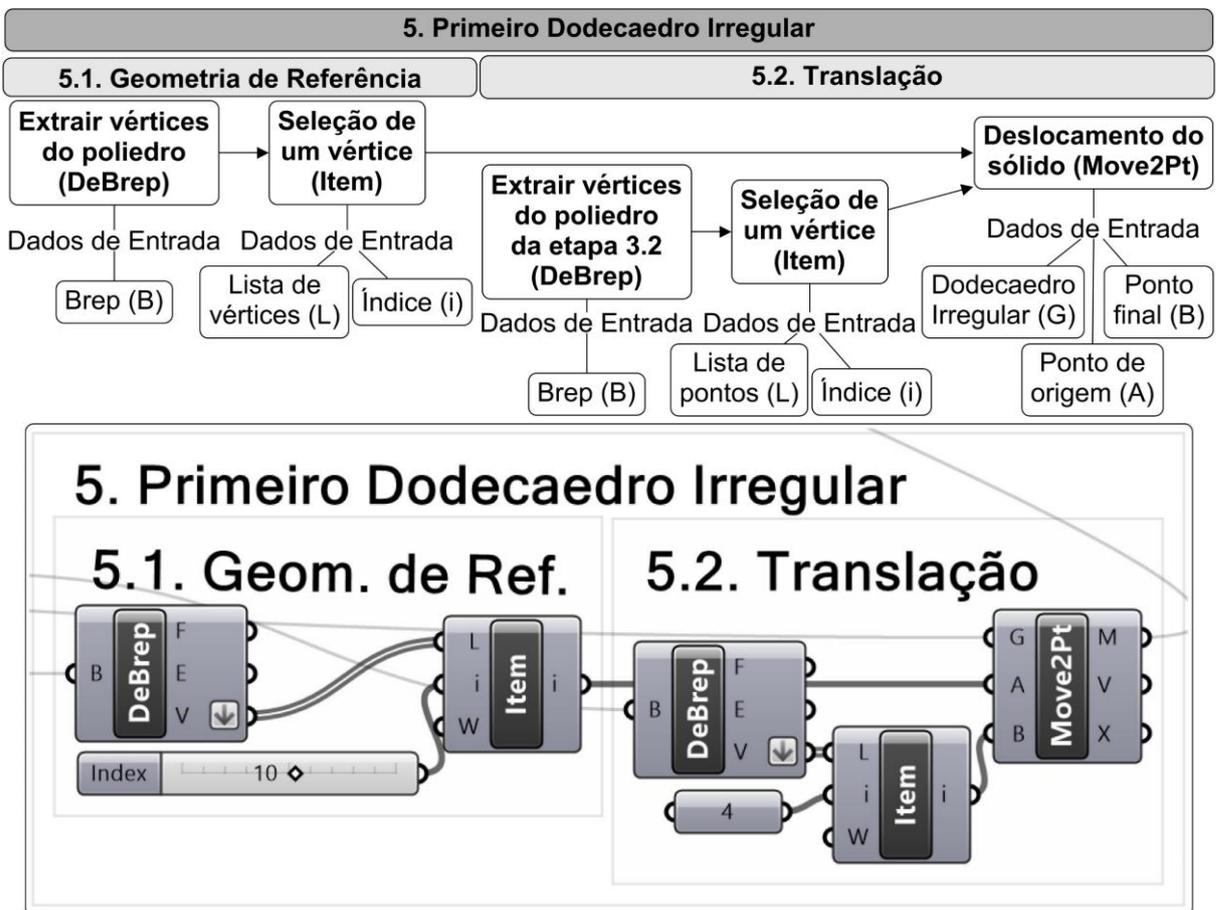


Figura AP 30 Esquema visual da etapa 5 da modelagem do modelo de WP.
 Fonte: Elaboração própria.

Da mesma maneira como na etapa 2.1 (definição de uma geometria de referência a partir de modelagens anteriores), a etapa 5.1 aborda a definição de uma geometria de referência para o dodecaedro irregular. Esse polígono encontra-se sobreposto a outras geometrias (Figura AP 31 A) e o ponto utilizado como referência é um de seus vértices com maior valor em Z (Figura AP 31 B). A definição desse ponto é de maneira arbitrária, para facilitar a visualização e a seleção do vértice. E ocorre pela desconstrução do poliedro (*DeBrep*) e seleção do ponto (*item*).

Na etapa 5.2, ocorre a translação do dodecaedro irregular, por meio do componente *Move2Pt* que, além da geometria (G), necessita de dois pontos de referência, construindo internamente um vetor de deslocamento. O ponto inicial (A) é o ponto citado anteriormente, destacado na Figura AP 31 B, enquanto o segundo ponto (B) tem origem na desconstrução do segundo par de tetrakaidecedros e extração de seus vértices (*DeBrep*), para então selecionar o ponto (*Item*) que permite o encaixe (Figura AP 31 C). Com isso, ocorre o posicionamento do primeiro dodecaedro irregular no modelo de WP (Figura AP 31 D).

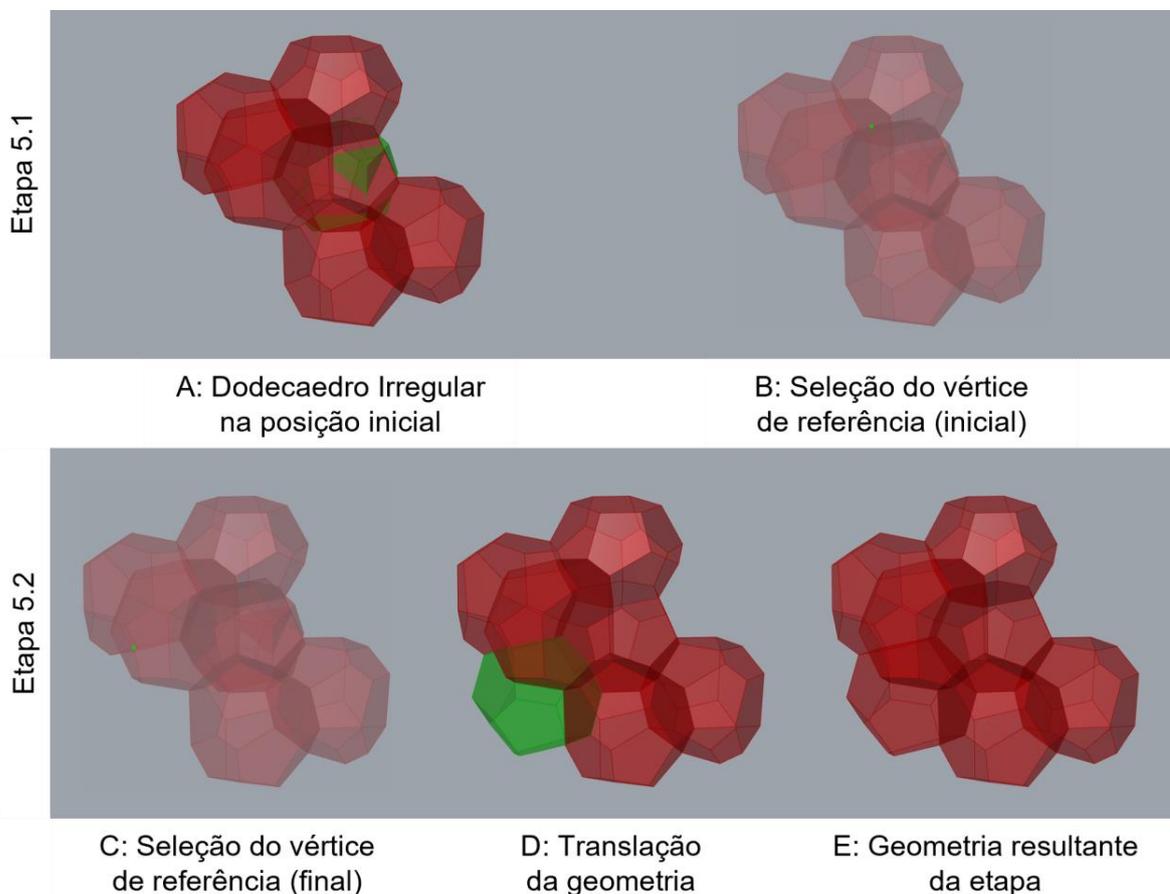


Figura AP 31 Representação gráfica da etapa 5 do modelo de WP.
Fonte: Elaboração própria.

Na etapa 6 (Figura AP 32) define-se o posicionamento espacial para a última célula do modelo, o segundo dodecaedro irregular, obtido a partir da translação e da rotação do primeiro. Aqui são aplicadas transformações geométricas equivalentes aquelas da etapa 4, replicando as transformações e os valores adotados. Ou seja, na etapa 5.1 está destacada a rotação do elemento (Figura AP 33 A) e na etapa 5.2 sua translação (Figura AP 33 B).

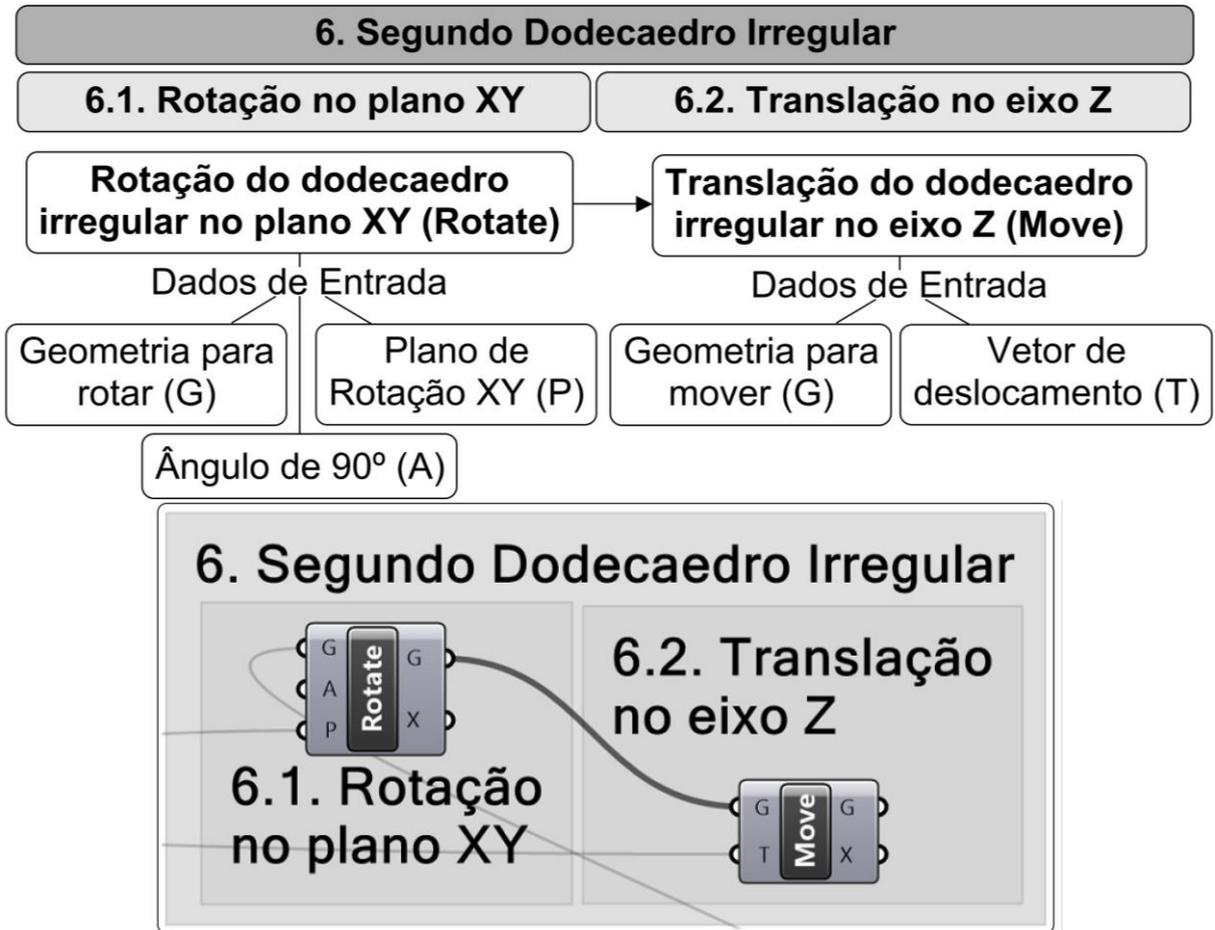


Figura AP 32 Esquema visual da etapa 6 da modelagem do modelo de WP.
 Fonte: Elaboração própria.

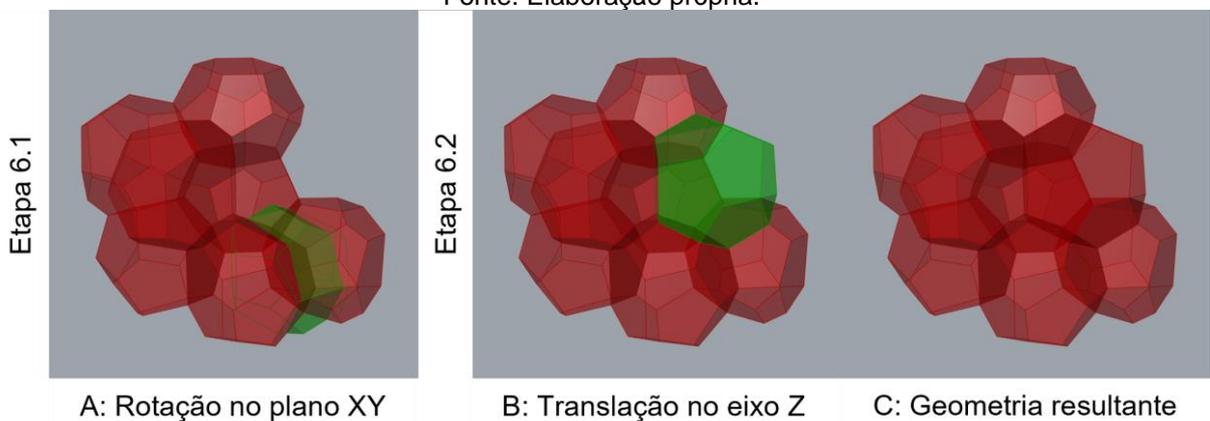


Figura AP 33 Representação gráfica da etapa 6 do modelo de WP.
 Fonte: Elaboração própria.

Apêndice D – Modelagem do Water Cube

A primeira etapa (Figura AP 34) apresenta a referência à geometria desenvolvida anteriormente (modelo de WP). O modelo é salvo no ambiente do *Rhinceros*, referenciado para o *Grasshopper* e, na sequência, internalizado em um componente do tipo parâmetro da classe “geometria”, para que então se proceda sua transformação em um modelo de malha.

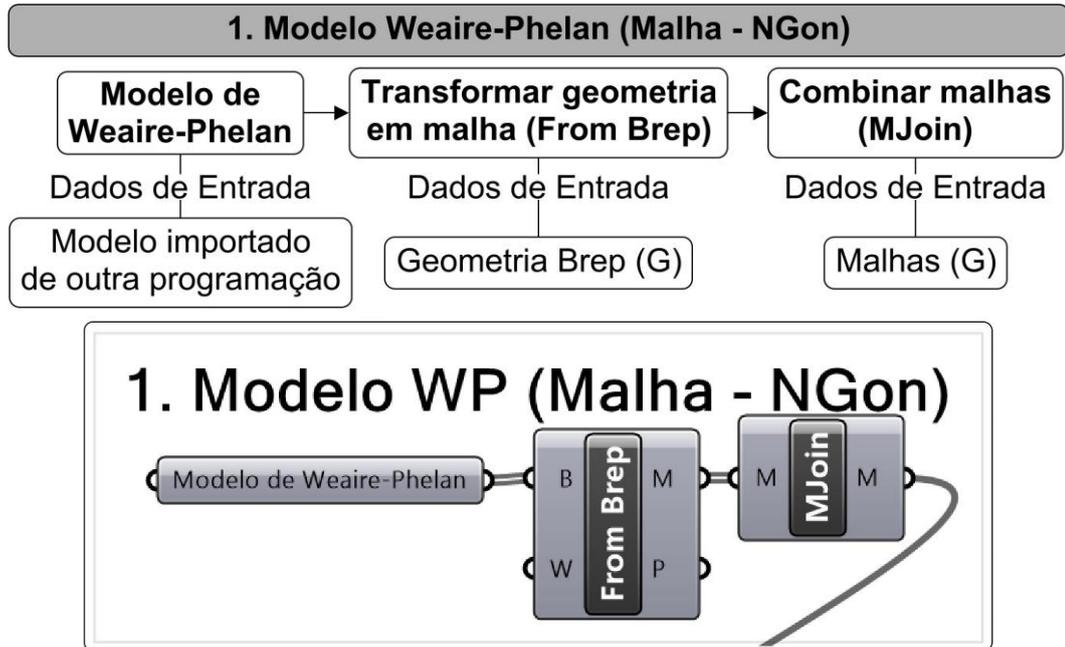


Figura AP 34 Esquema visual da etapa 1 da modelagem do Water Cube.
 Fonte: Elaboração própria.

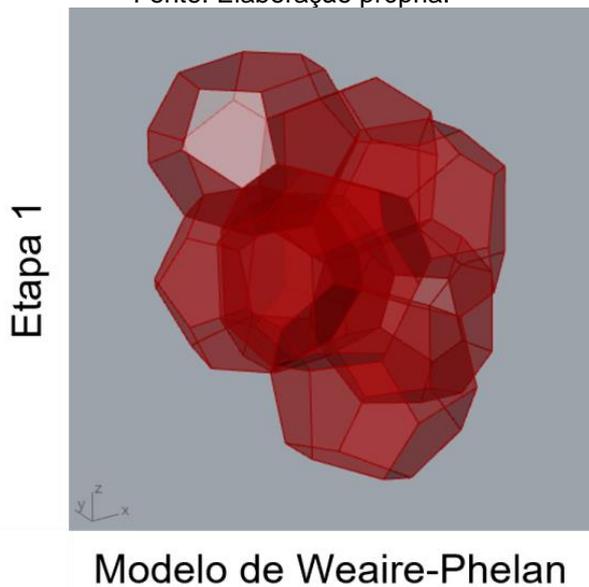


Figura AP 35 Representação gráfica da etapa 1 do modelo do Water Cube.
 Fonte: Elaboração própria.

Nesse momento, a geometria está configurada como uma *Brep*, ou seja, uma superfície limite, como o envoltório de um sólido. Insere-se o componente que transforma essa geometria em malha (plugin *N-Gon*, componente *From Brep*) e que possui como dado de saída 8 malhas distintas, uma para cada célula do modelo. Ao final da etapa 1 há o agrupamento das malhas para otimizar e organizar o processo de modelagem. Não há alteração visual na geometria do modelo de WP (Figura AP 35), porém existe uma nova estrutura geométrica para definir sua forma.

Em seguida, fica estabelecida a repetição do modelo por simetria de translação da espuma resultando em sua conformação na forma de um “cubo”. Na Figura AP 36 está o esquema visual constituído pela estrutura de saber referente à etapa 2 do processo de modelagem do Water Cube, enquanto que na Figura AP 37 está a representação gráfica dessa etapa.

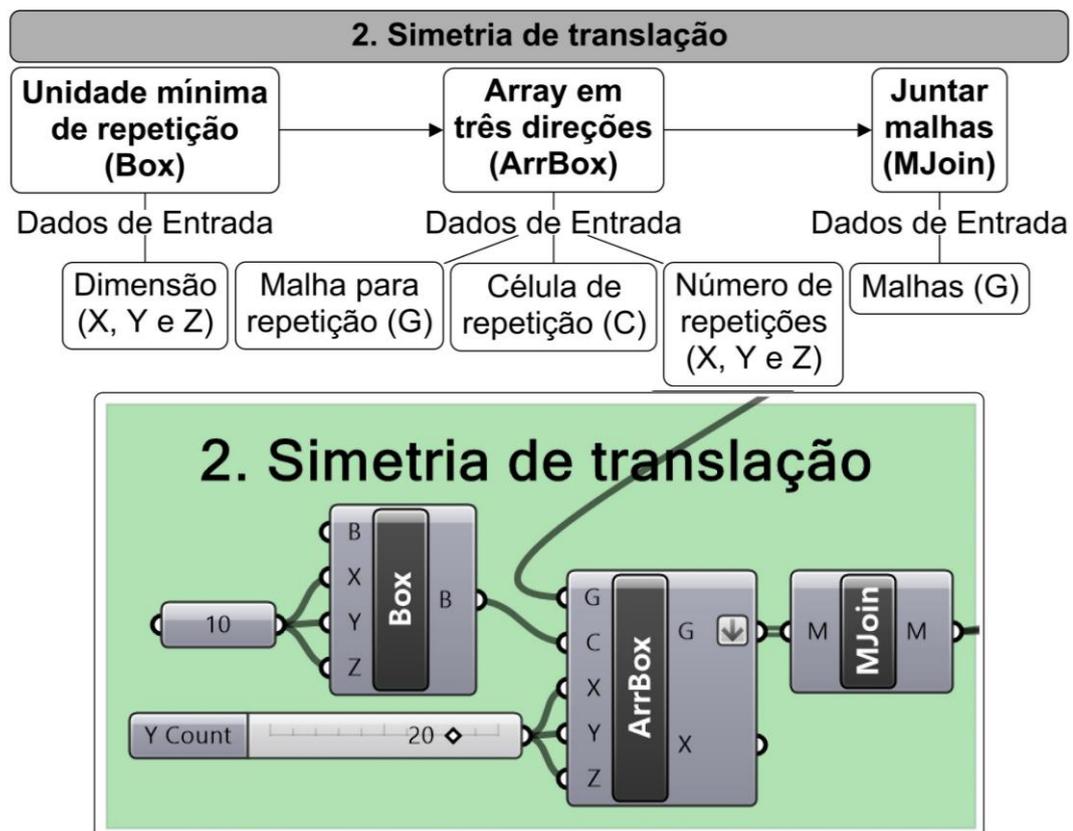


Figura AP 36 Esquema visual da etapa 2 da modelagem do Water Cube.
Fonte: Elaboração própria.

O componente central dessa etapa é o *Arrey Box* (*ArrBox*), responsável por um processo compositivo de simetrias de translação nos três eixos (X, Y e Z), ou seja, repete uma geometria N vezes em cada direção. Para isso, os dados de entrada necessários para definir o componente são: a geometria (modelo de WP)

que será repetida (G), ilustrada na Figura AP 37 A; a célula de repetição (C), que representa um prisma que envolve (tangencia) a geometria a ser repetida (Figura AP 37 B), mas que nesse caso não envolve totalmente a estrutura devido a suas reentrâncias e encaixes nela mesma; e o número de repetições em cada eixo (X, Y e Z) para que origine o “cubo” utilizado no projeto, neste caso, 19 repetições. O resultado está ilustrado na Figura AP 37 C. Além disso, o último componente dessa etapa (*MJoin*) é responsável por juntar as 6859 malhas dos modelos de WP (resultantes da translação 19x19x19) em uma única, para facilitar o processamento da geometria na sequência da programação (Figura AP 37 D).

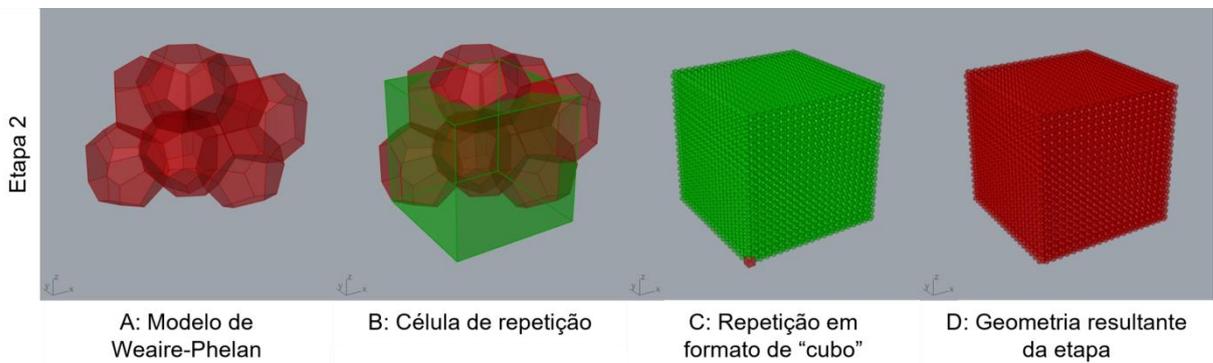


Figura AP 37 Representação gráfica da etapa 2 do modelo do Water Cube.
 Fonte: Elaboração própria.

Na etapa 3 (Figura AP 38) estão as etapas de rotação do modelo, sendo possível identificar cada uma delas a partir das imagens da Figura AP 39.

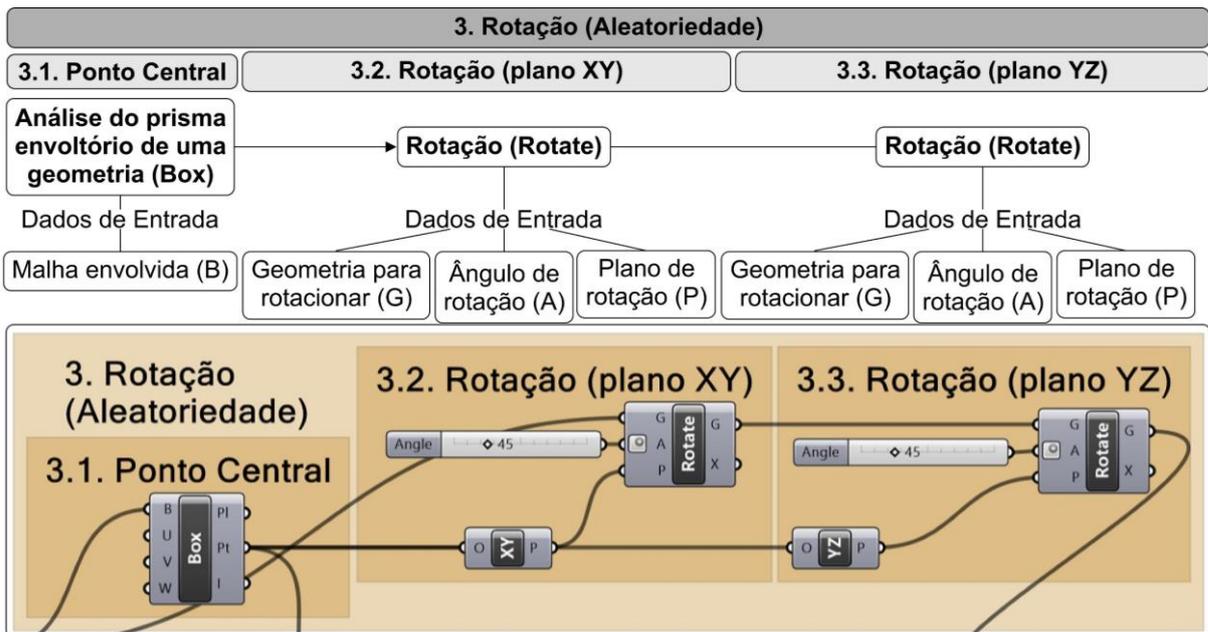


Figura AP 38 Esquema visual da etapa 3 da modelagem do Water Cube.
 Fonte: Elaboração própria.

Para aplicar a rotação do modelo, é necessário definir um plano de rotação. Define-se também o ponto origem desse plano, para se ter um maior controle no deslocamento do objeto no espaço tridimensional. Então, busca-se rotacionar o “cubo” a partir do seu ponto central, para isso, aplica-se o componente de análise do prisma reto que envolve uma geometria (*Box*), como pode ser visto na Figura AP 39 A, e que tem como um de seus dados de saída o ponto central do envoltório (*Pt*), o ponto de origem do plano de rotação.

Com isso, parte-se para as rotações (*Rotate*). Para a primeira, define-se o plano XY como referência (*P*) e o valor de 45° para o ângulo de rotação (*A*) (Figura AP 39 B). Para a segunda rotação do modelo, o plano de referência (*P*) utilizado é o YZ, enquanto que o ângulo de rotação (*A*) se mantém o mesmo (Figura AP 39 C). O resultado dessas transformações geométricas pode ser visto na Figura AP 39 D.

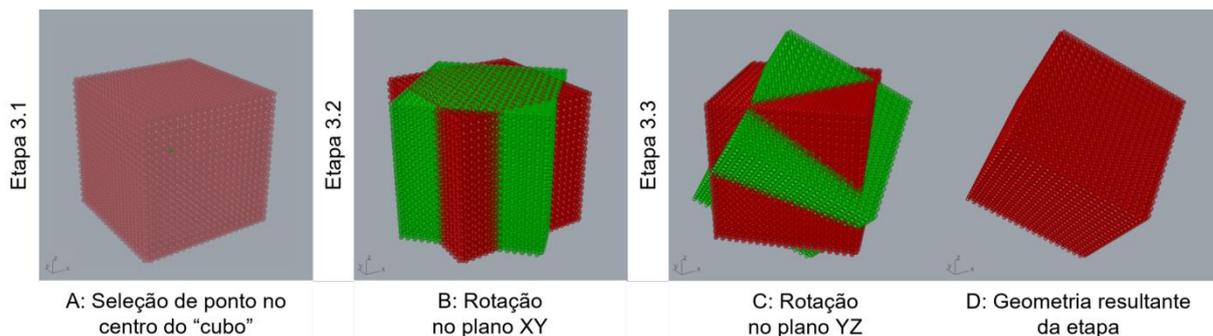


Figura AP 39 Representação gráfica da etapa 3 do modelo do Water Cube.
Fonte: Elaboração própria.

Na etapa seguinte (Figura AP 40) se estabelece a forma base do envoltório do projeto. O projeto do Water Cube tem sua forma atrelada a um prisma reto de base quadrada, cujas dimensões originais são 150x150m na base e 30m de altura.



Figura AP 40 Esquema visual da etapa 4 da modelagem do Water Cube.
Fonte: Elaboração própria.

Na etapa 4 define-se o prisma retangular de base quadrada (Figura AP 41 B) a partir do componente de criar caixas (*Box*), referenciando o plano base (B) como o plano XY com origem no centro da geometria rotacionada da etapa 3. Para as dimensões da caixa, em X e Y é utilizado o valor de 75, pois o componente adota o valor inserido nos dois sentidos de cada eixo, portanto para obter a aresta de 150m insere-se metade desse valor. E, por fim, a altura do prédio é inserida como o dado de entrada Z do componente, seguindo a mesma lógica das demais dimensões, ou seja, insere-se o valor 15 para obter a altura equivalente a 30m.

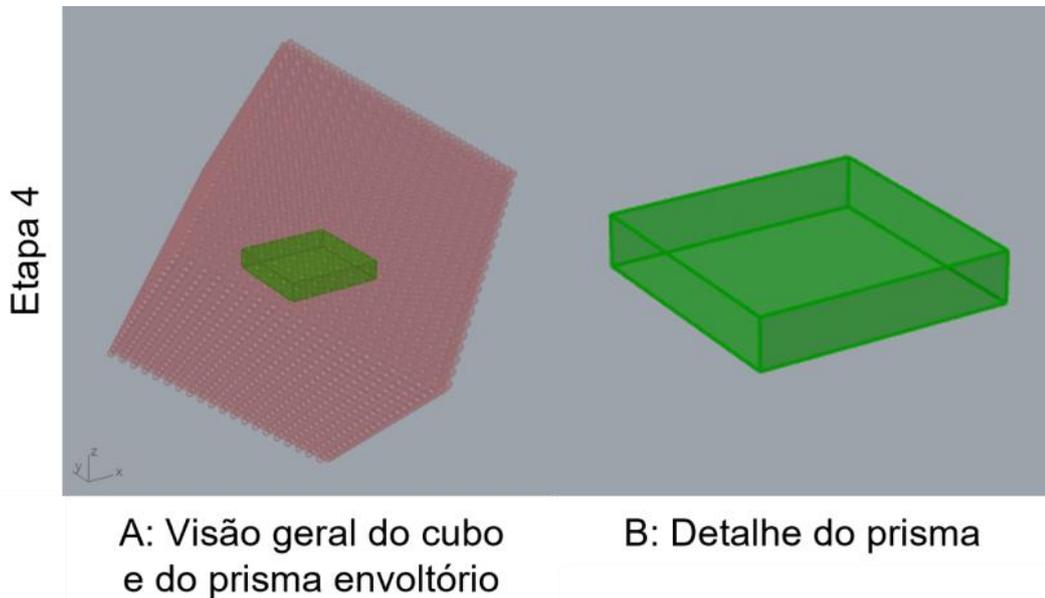


Figura AP 41 Representação gráfica da etapa 4 do modelo do Water Cube.
Fonte: Elaboração própria.

Até esse momento, há a seleção do prisma (a forma base do projeto), porém a estrutura interna do prédio é resultado da intersecção do cubo rotado com essa geometria. A etapa 5 (Figura AP 42) é referente a esse processo. Ressalta-se que, para o desenvolvimento da pesquisa não foi considerada a definição dos principais espaços internos, realizada no projeto por intermédio de subtração de prismas.

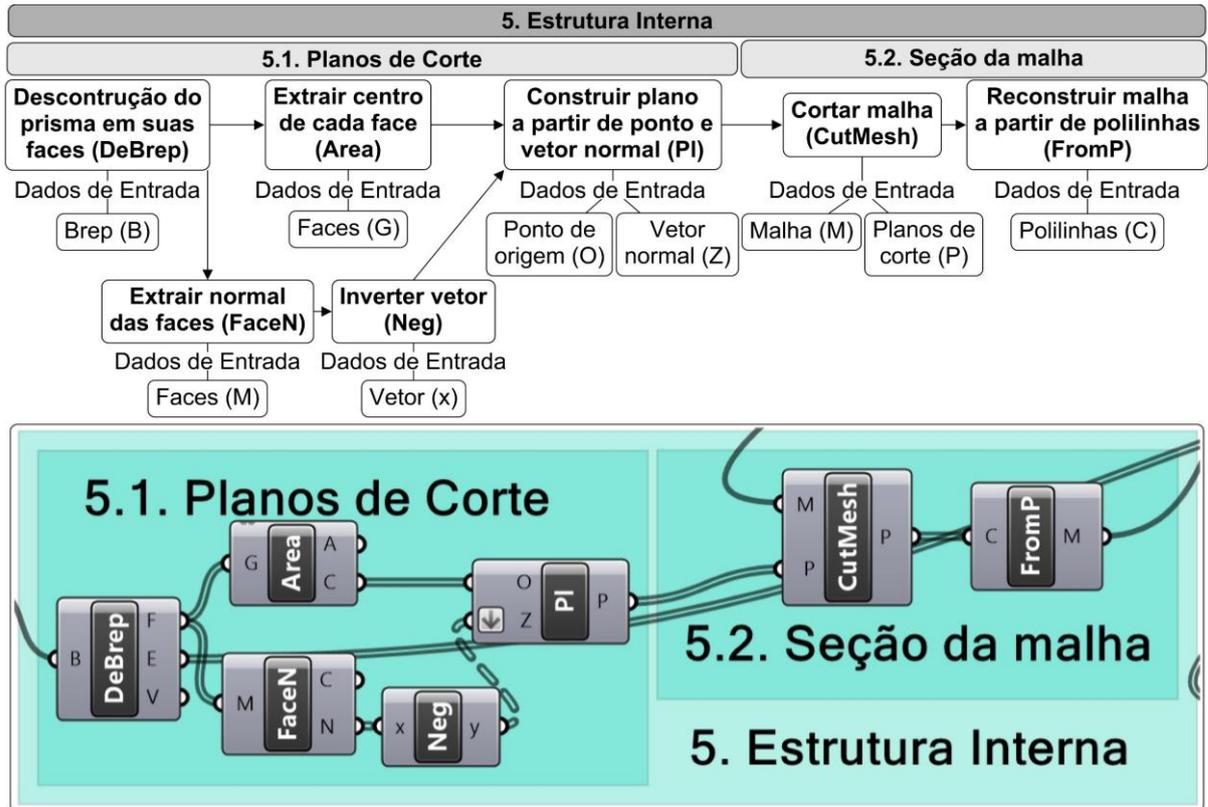


Figura AP 42 Esquema visual da etapa 5 da modelagem do Water Cube.

Fonte: Elaboração própria.

Já na etapa 5.1, desconstrói-se o prisma em suas faces para, na próxima etapa, cortar o cubo a partir delas. Nesse momento o prisma definido na etapa 4 é desmembrado (*DeBrep*) para obter suas faces. Depois, são selecionados o centro de cada uma dessas faces por meio do componente *Area* (Figura AP 43 A) para que sejam criados planos (*Pi*), destacados na Figura AP 43 B. Porém, como os planos serão utilizados para dividir a malha (cubo), ao serem criados é necessário definir o vetor normal de cada um. Para isso, aplica-se o componente de extrair a normal das faces (*FaceN*) e, como esses vetores encontram-se direcionados para o centro do prisma, inverte-se a direção/sentido (*Neg*).

Por fim, na etapa 5.2 se aplica o corte do cubo rotado a partir dos planos. Por meio do componente de corte (*CutMesh*), a malha (aqui configurada como um *NGon*) é seccionada e mantém-se apenas a porção localizada no lado positivo do plano (Figura AP 43 C). Ou seja, destaca-se a importância de inverter o sentido das normais na etapa 5.1, para que seja removida a parte da malha localizada “para fora do prisma”. Como resultado, a geometria oriunda desse processo são as arestas que integravam a malha (em detalhe na Figura AP 43 D), sendo necessário retomar à essa estrutura por meio de um componente que crie malhas a partir de

polígonos/polilinhas (*FromP*). A geometria resultante dessa etapa pode ser vista na Figura AP 43 E.

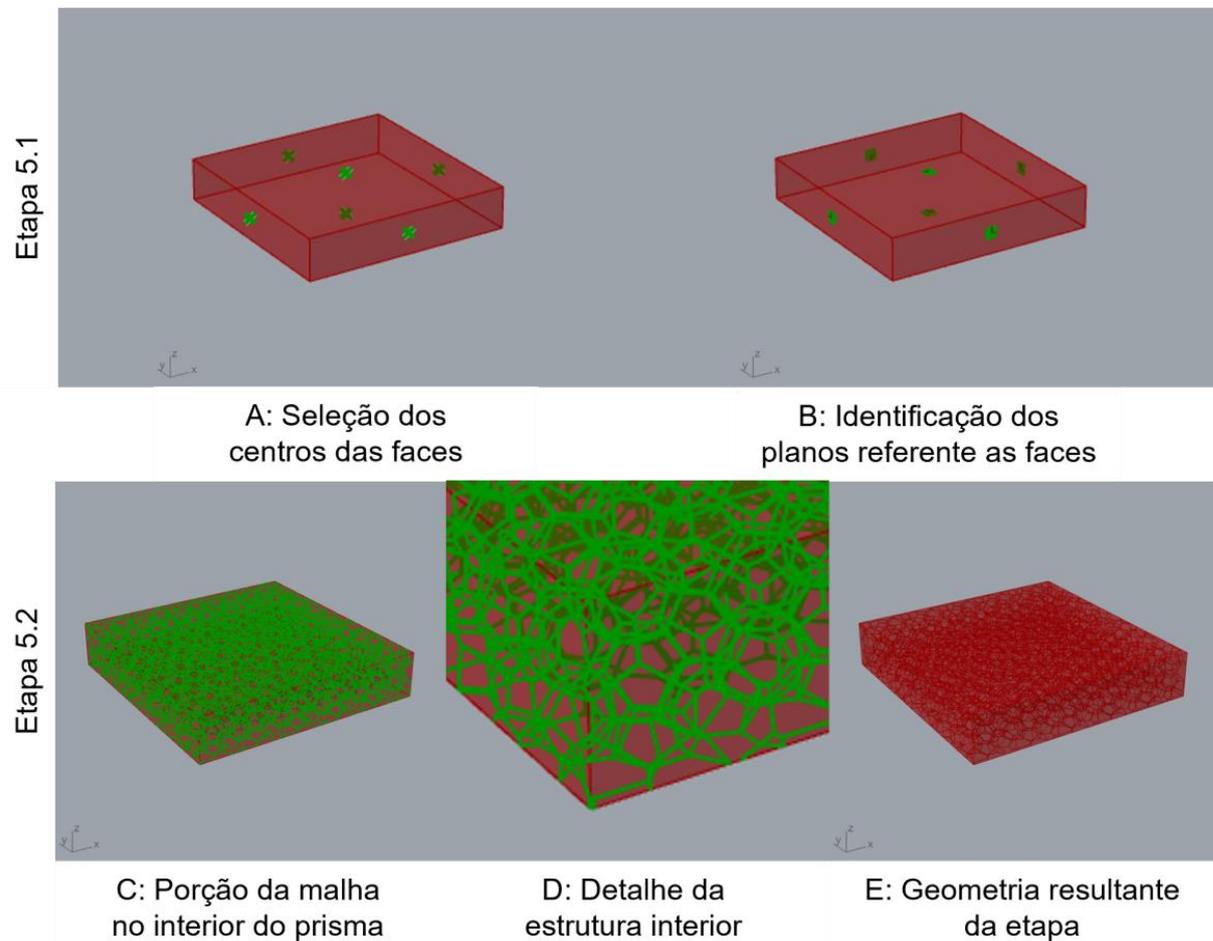


Figura AP 43 Representação gráfica da etapa 5 do modelo do Water Cube.
Fonte: Elaboração própria.

Embora as malhas internas do projeto sejam a repetição ordenada de um padrão (de WP), agora conhecido, a intersecção dessa estrutura com as faces planas do prisma configura outro padrão, chamado de Voronoi. Porém, essa estrutura só é visível na fachada das faces laterais e superior, uma vez que a base do projeto é um bloco de concreto.

Na etapa 6 (Figura AP 44) está o processo de seleção e transformação das arestas visíveis. Quando o ponto médio da aresta possui coordenada Z idêntica à da face inferior do prisma, pode-se dizer que todo o elemento está repousando nesse plano inferior. Então essas arestas são desconsideradas. Depois, é estabelecida uma espessura e aparência (cor) para as arestas restantes da fachada.

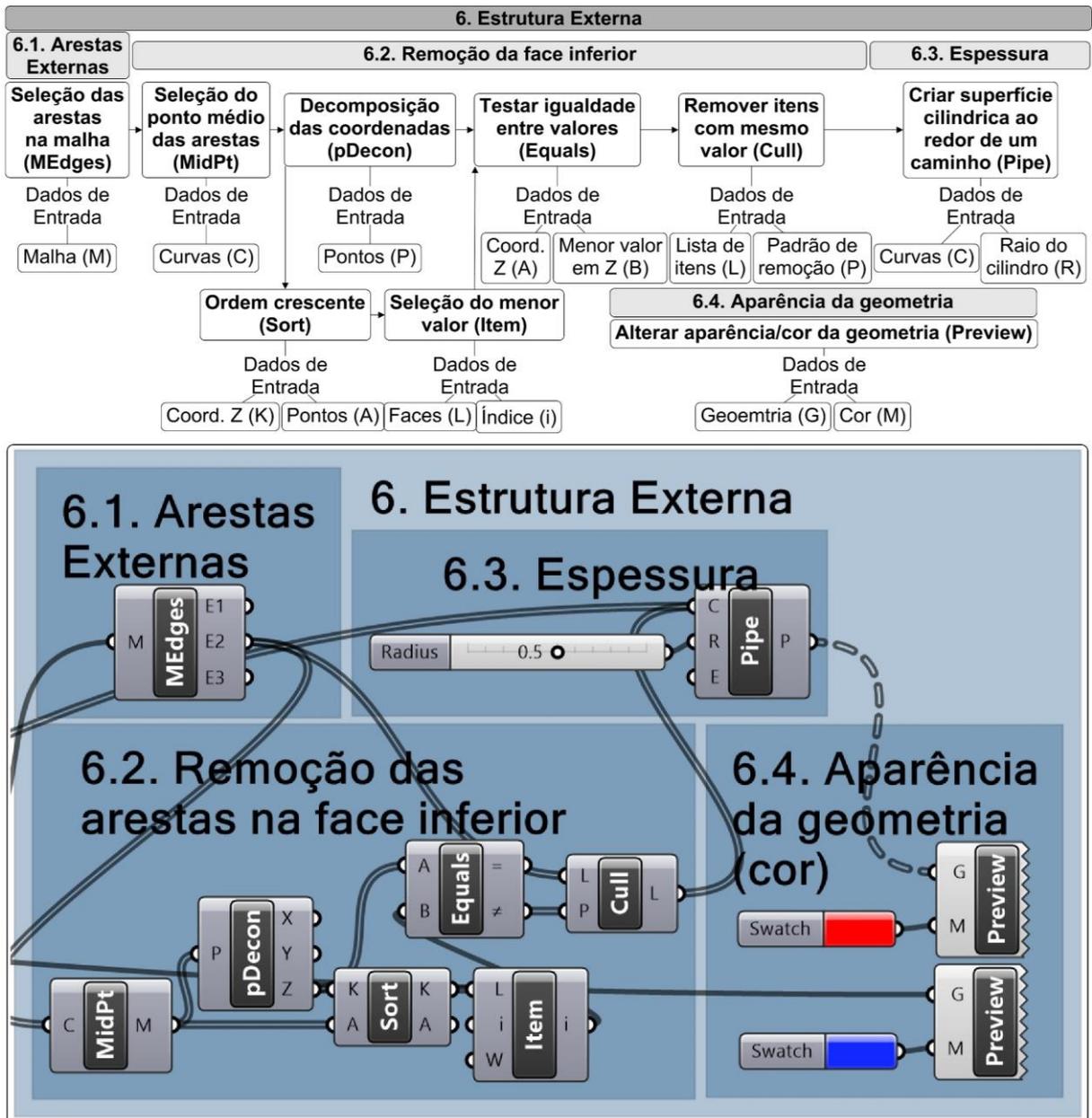


Figura AP 44 Esquema visual da etapa 6 da modelagem do Water Cube.
Fonte: Elaboração própria.

Na etapa 6.1 ocorre a seleção das arestas localizadas no perímetro da malha, que definem o envoltório do prisma que dá origem ao Water Cube, para evidenciar o padrão Voronoi presente na fachada. Para isso, o componente de arestas de malha (*MEEdges*) diferencia as arestas a partir de sua valência, ou seja, pelo número de conexões com faces. Como a origem da estrutura está na repetição dos modelos de bolha, todas as arestas internas apresentam valência maior que dois, pois pertencem a diversas faces (de diferentes poliedros). Nesse sentido, quando se seleciona apenas as arestas com valência dois (duas faces compartilham a mesma aresta), selecionam-se apenas os elementos do envoltório (Figura AP 45 A).

Depois, na etapa 6.2 é testada a posição das arestas em relação à face inferior. Os pontos médios (Figura AP 45 C) são obtidos através do componente específico para isso (*MidPt*), depois todos os pontos são decompostos em suas coordenadas (*pDecon*) para uma listagem em ordem crescente (*Sort*) dos valores Z. Para definir se as arestas estão na face inferior do prisma, testa-se a coordenada Z de todos eles em relação ao menor valor (*Equals*), para que seja gerado uma lista utilizada como padrão de remoção de itens (*Cull*).

Com isso, há a seleção das arestas das faces laterais e superiores (em detalhe na Figura AP 45 D). Na etapa 6.3, gera-se uma superfície cilíndrica por varredura, ao longo das linhas que representam as arestas (*Pipe*), cujos dados de entrada são as linhas (C) que atuam como diretrizes e o raio de um cilindro (R), que atua como a geratriz da superfície. O resultado está ilustrado na Figura AP 45 E, e, em detalhe, na Figura AP 45 F. Por fim, na etapa 6.4 apresenta-se uma visualização (*Preview*) com aplicação de cor aos elementos selecionados, destacando as arestas em vermelho e o prisma em azul (Figura AP 45 G).

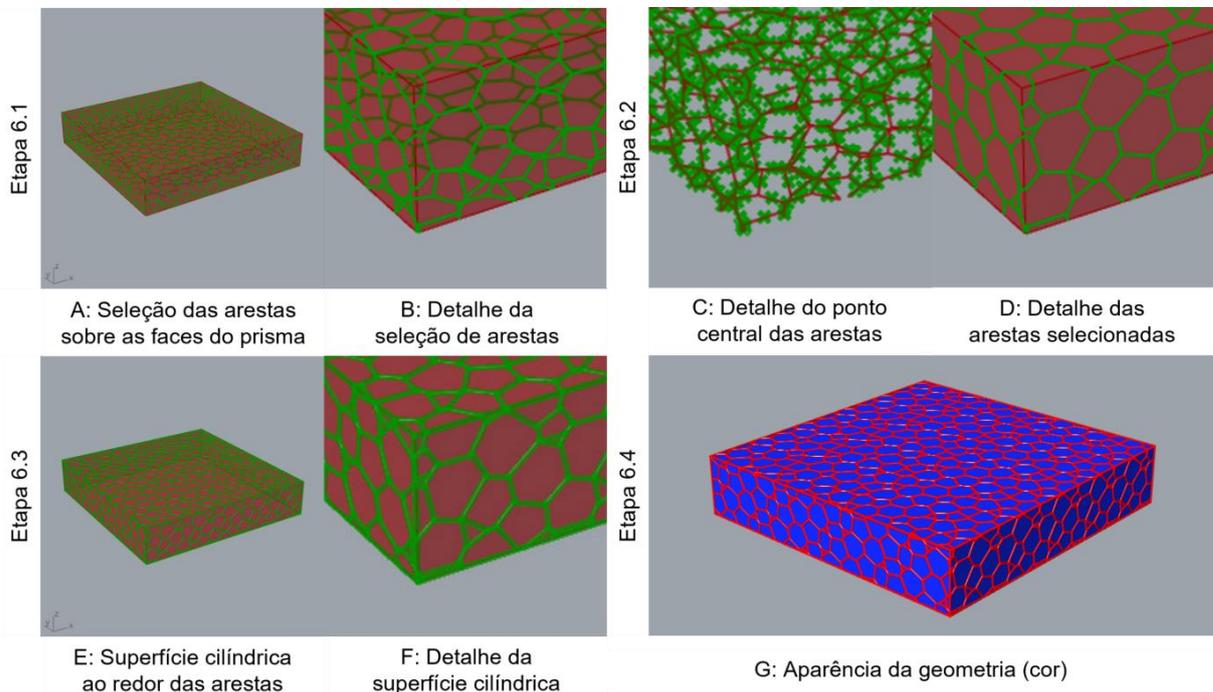


Figura AP 45 Representação gráfica da etapa 6 do modelo do Water Cube.

Fonte: Elaboração própria.

Apêndice E – Modelagem do Pavilhão Shellstar (estrela de cinco pontas)

A programação visual desenvolvida para o modelo do Pavilhão Shellstar será explicitada em cada uma de suas etapas. Na primeira, foram construídos e transformados os pontos iniciais para posicionar cada um deles de forma a configurar o módulo inicial do projeto. Para isso, seguiu-se a lógica identificada no esquema da Figura AP 46, construído a partir do material de Matsys (c2022), que explicita o processo de planejamento da representação desse módulo inicial.

Partindo de um ponto central P1 (Figura AP 46 A), constrói-se um pentágono (Figura AP 46 B), para extrair os pontos P2 e P3 (Figura AP 46 C). Estes serão os vértices de um eixo (Figura AP 46 E) de espelhamento do ponto P1 para obter-se o ponto P4 (Figura AP 46 F). Por fim, realiza-se uma rotação de P4 com centro em P3 para obter o ponto P5 (Figura AP 46 H, I e J).

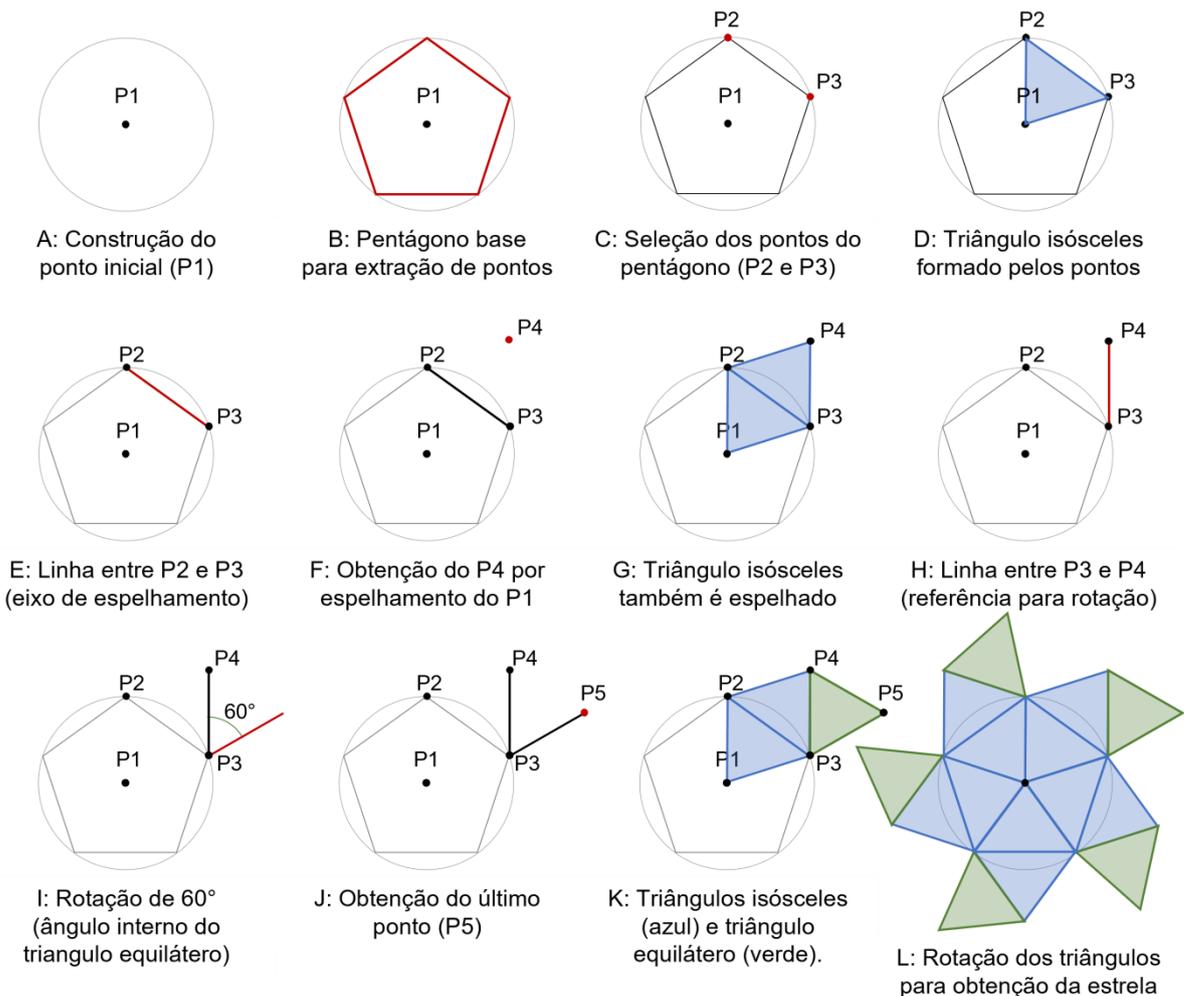


Figura AP 46 Processo de representação da geometria base (estrela de cinco pontas) do Pavilhão Shellstar.

Fonte: elaboração própria.

A partir desse esquema, foi desenvolvida a estrutura de saber que compreende a construção desse módulo, conforme mostrado na Figura AP 47.

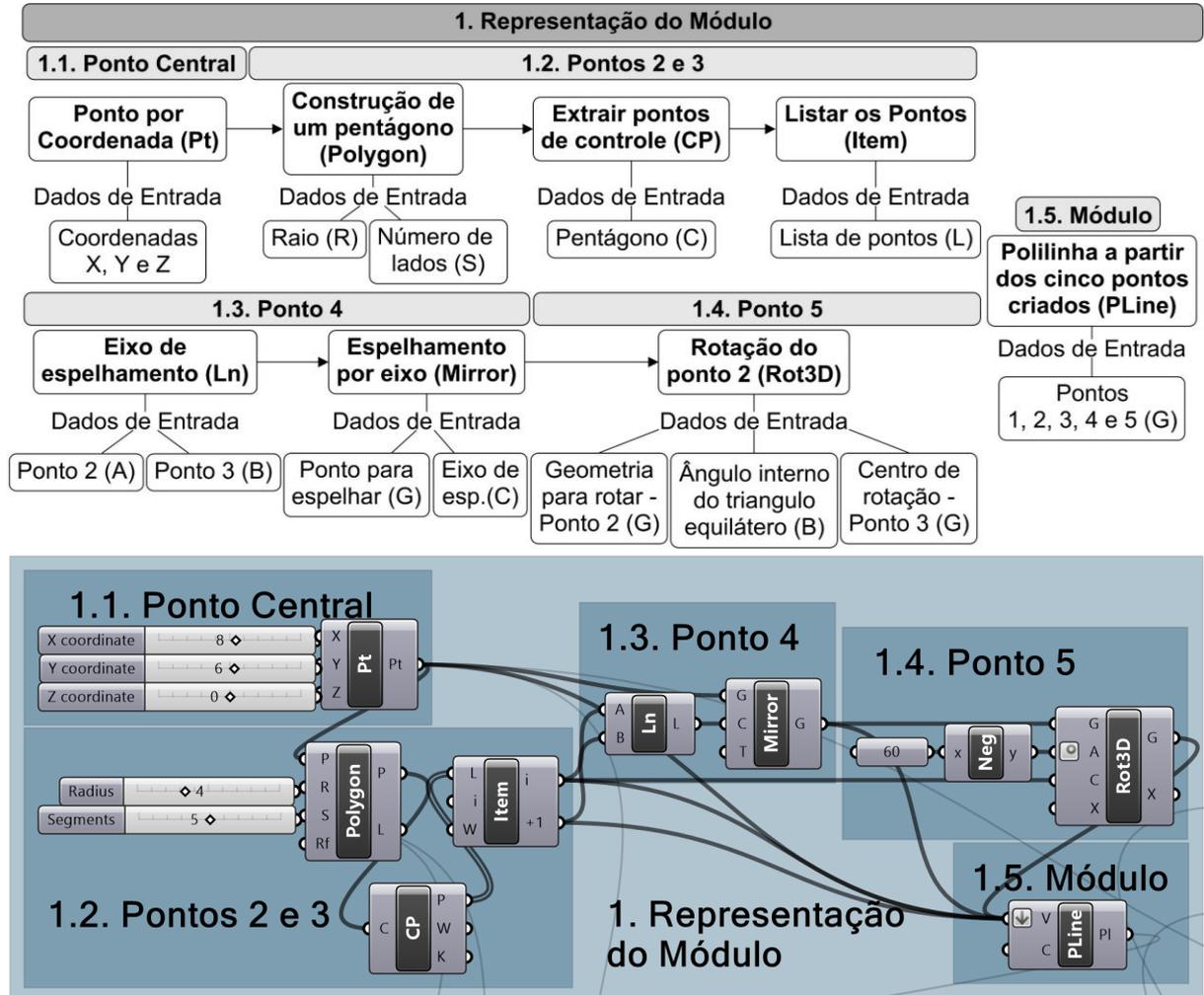


Figura AP 47 Esquema visual da etapa 1 da modelagem da Shellstar.
 Fonte: Elaboração própria.

Na Figura AP 48 são apresentadas as imagens da representação gráfica dessa primeira etapa. O primeiro elemento construído foi o ponto central do pavilhão (Figura AP 48 A), utilizando o componente de ponto por coordenadas (*Pt*). Em seguida, foi inserido o polígono base do pavilhão, o pentágono (Figura AP 48 B). Para isso, construiu-se o polígono (*Polygon*) a partir dos seguintes dados de entrada: o primeiro ponto, como ponto central (*P*); um raio (*R*) de valor quatro, conforme os esquemas de Matsys (c2022); e número de lados (*S*) igual a cinco para formar o pentágono. A partir daí, extraiu-se os pontos de controle da figura (*CP*) e selecionou-se os itens (*Item*) para obter os pontos 2 e 3 (Figura AP 48 D).

Para o ponto 4, realizou-se um espelhamento (*Mirror*) do primeiro ponto em relação a um eixo imaginário entre os pontos 2 e 3, construído como uma linha (*Ln*) entre esses dois pontos (Figura AP 48 E e F). De acordo com o descrito na análise da geometria base, os pontos representados até aqui compõem triângulos isósceles, enquanto que o último ponto fecha um triângulo equilátero. Para isso, realizou-se uma rotação (*Rot3D*) do ponto 4 em relação ao ponto 3 (dado de entrada C), utilizando um ângulo de rotação (dado de entrada A) de 60 graus, o ângulo interno de um triângulo equilátero (Figura AP 48 G).

Com os cinco pontos definidos, foi possível conectá-los e representar o perímetro do módulo inicial (Figura AP 48 H). Utilizou-se o componente de polilinha (*PLine*), com base nos pontos definidos (P) e indicando que o elemento será uma curva fechada no dado de entrada (C). Ao final, obtém-se o perímetro do módulo. As etapas seguintes transformam a geometria como uma malha e passam a abordar suas transformações, de maneira a otimizar o processo de representação digital.

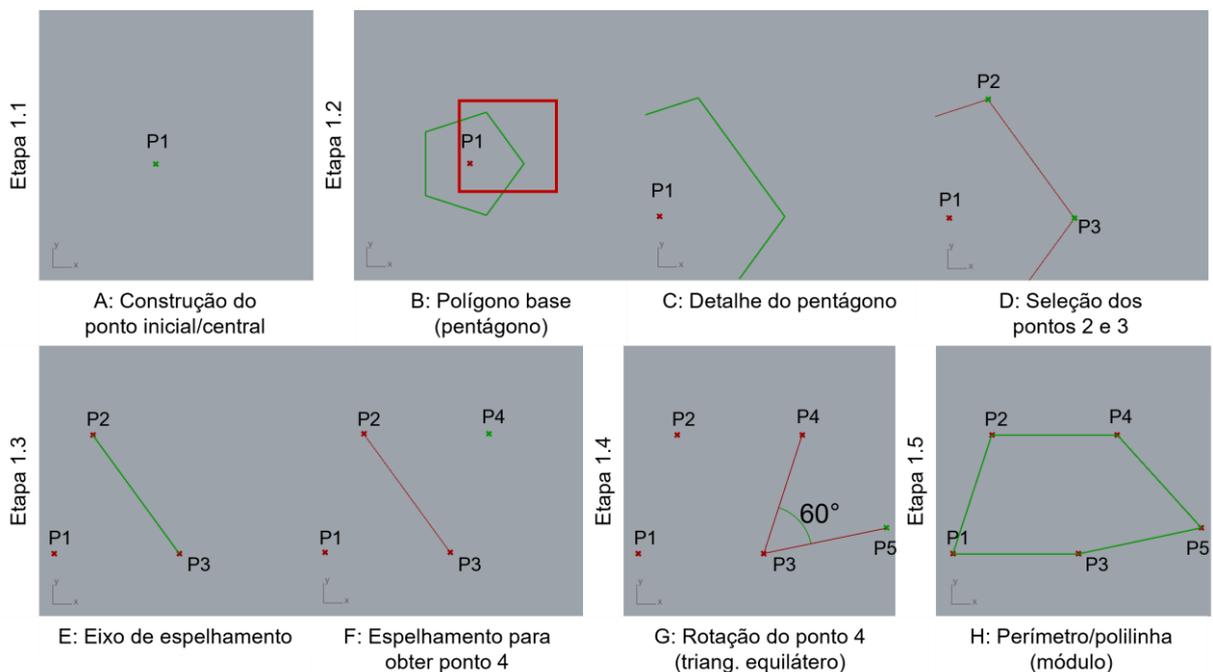


Figura AP 48 Representação gráfica da etapa 1 do modelo da Shellstar.

Fonte: Elaboração própria.

Depois, a programação segue a lógica do esquema síntese apresentado: o módulo é transformado em malha (tesselação na etapa 2), suas faces são subdivididas (refinamento na etapa 3) e, por fim, é estabelecida rotação do módulo (definição da estrela de cinco pontas na etapa 4). A estrutura do saber referente a essas etapas está na Figura AP 49.

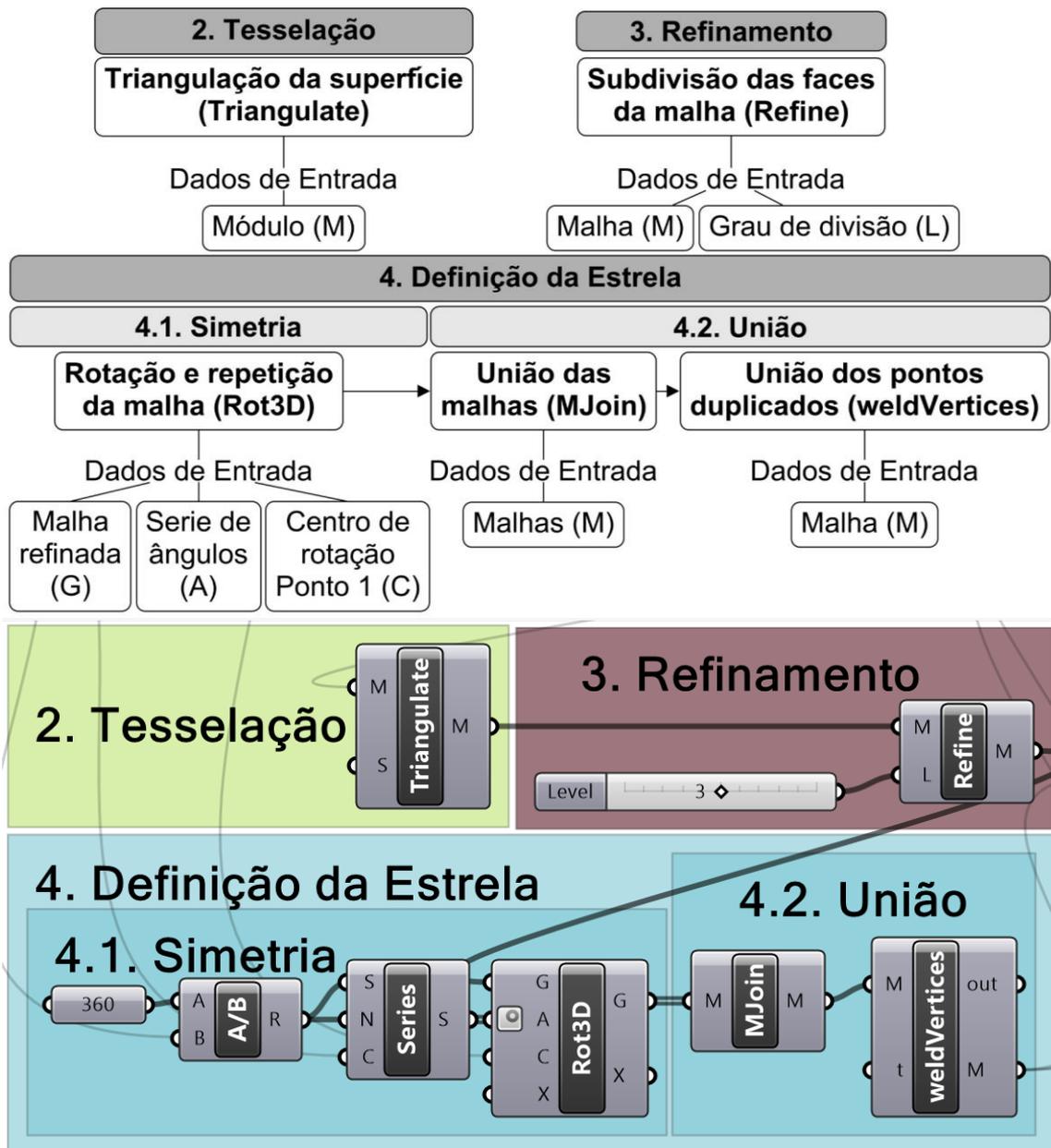


Figura AP 49 Esquema visual das etapas 2, 3 e 4 da modelagem da Shellstar.
Fonte: Elaboração própria.

E na Figura AP 50 estão ilustradas detalhadamente essas mesmas etapas. A etapa 2 consistiu na tesselação do módulo, ou seja, transformar sua superfície em uma malha (Figura AP 50 A). Para isso, utilizou-se o processo de triangulação (Triangulate) a partir da superfície/malha. Como a geometria inserida é uma polilinha fechada, o componente apresenta como dado de saída uma malha, que passa a ser abordada em termos de faces triangulares. Na etapa 3 (Figura AP 50 B), ocorreu o refinamento da malha (*Refine*), subdividindo cada uma das faces triangulares construídas na etapa anterior em elementos menores. Para obter o mesmo número

de células/faces mencionado pelos responsáveis, definiu-se um número de subdivisões equivalente a três, resultando em três níveis diferentes de triângulos.

A etapa 4 englobou as transformações responsáveis por definir a estrela base, que faz referência à orquídea de Hong Kong. Nessa etapa, o módulo – agora uma malha refinada – foi rotado e repetido (*Rot3D*) cinco vezes (Figura AP 50 C e D). Para que houvesse simultaneamente as cinco rotações do módulo, definiu-se uma série de valores (*Series*) a partir dos dados de entrada: valor inicial de rotação igual a zero (S); um intervalo entre os valores (N) igual a 72 (ângulo interno do pentágono); e um número de repetições (C) para definir a estrela de cinco pontas. Ao final desse processo, obteve-se cinco malhas rotadas, que precisaram ser juntadas (*MJoin*) em uma única malha (etapa 4.2) para dar continuidade ao processo de modelagem. Nesta etapa, também foram unificados os pontos sobrepostos (*weldVertices*), já que as cinco malhas possuem arestas e vértices em comum. Esse último processo não resulta em nenhuma alteração na representação gráfica nesse momento, mas é importante para remover elementos duplicados que causariam problemas nas próximas etapas.

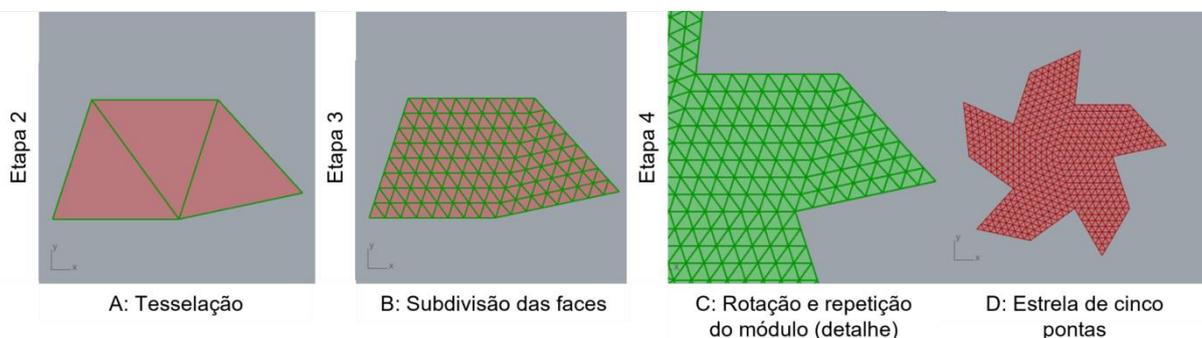


Figura AP 50 Representação gráfica das etapas 2, 3 e 4 do modelo da Shellstar.
Fonte: Elaboração própria.

Como resultado, tem-se uma única malha para todo o projeto. Dando continuidade ao processo, transformaram-se as faces triangulares da malha em polígonos hexagonais, além de realizar as transformações necessárias para excluir (remover) elementos, conforme os esquemas apresentados e descritos por Matsys (c2022). Na estrutura do saber referente à etapa 5 (Figura AP 51), são realizadas as transformações na geometria da malha para configurar as células hexagonais.

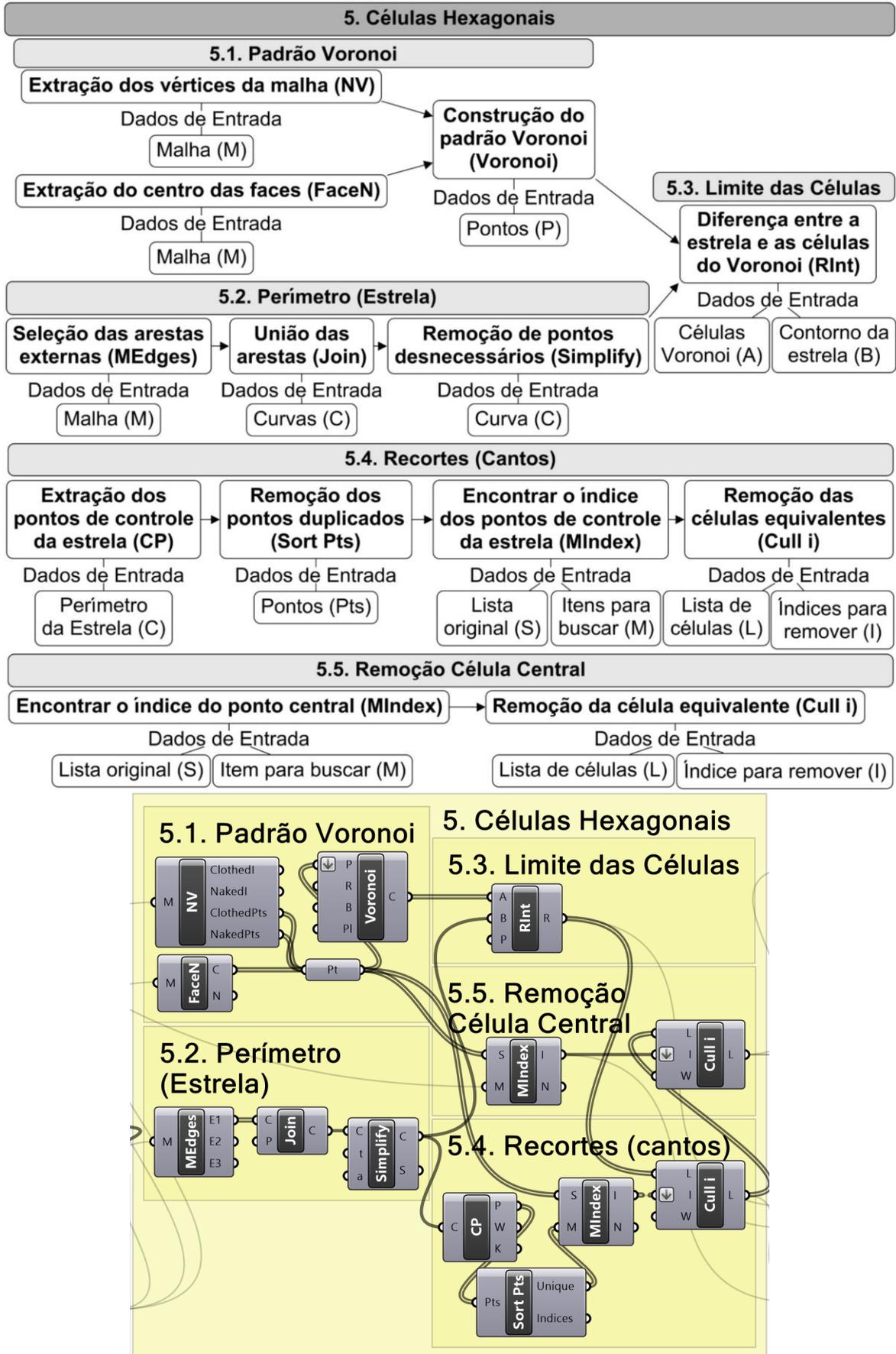


Figura AP 51 Esquema visual da etapa 5 da modelagem da Shellstar.
 Fonte: Elaboração própria.

Primeiramente, com o componente *NV (Naked Vertices)*, são selecionados os vértices da malha (Figura AP 52 A) e, com o componente *FaceN*, extraídos os centros das faces (Figura AP 52 B). Esse conjunto de pontos é inserido como dado de entrada em um componente que organiza o espaço em um padrão de Voronoi (*Voronoi*), formando células que tendem ao formato hexagonal (sobreposta à malha na Figura AP 52 C e destacado na Figura AP 52 D).

No entanto, no limite desta geometria o fechamento das células é feito automaticamente com linhas curvas e não com linhas retas como no restante do padrão Voronoi, remetendo a geometria de bolhas projetadas no plano. Isso porque, caso os pontos que dão origem ao padrão estejam muito afastados, as células são círculos em expansão e só quando encontram umas às outras que se cria o fechamento retilíneo entre as células. Então, na etapa 5.2, é feita uma interseção com o perímetro linear da estrela de cinco pontas para configurar o limite retilíneo das células limítrofes do padrão Voronoi.

As arestas externas da malha (*MEdges*) são selecionadas como dado de saída E1 do componente, representando as arestas que pertencem a apenas uma face da malha (Figura AP 52 E). O componente de seleção das arestas da malha diferencia o número de faces que a aresta compõe, permitindo extrair separadamente as arestas com uma, duas ou três faces conectadas. As arestas que pertencem a apenas uma face são aquelas que definem o limite externo da malha, ou seja, o perímetro da geometria da estrela. Em seguida, na Figura AP 52 F as arestas selecionadas são unidas em uma única curva (*Join*) e na Figura AP 52 G simplificadas (*Simplify*) para remover os pontos de controle desnecessários, tais como os que estão no meio de uma linha reta.

Uma vez estabelecido o limite da estrela, na etapa 5.3 é realizada a interseção (*RInt*) entre as células (A) e a estrela (B), conforme apresentado na Figura AP 52 H. Na etapa 5.4, as células nos cantos da estrela são removidas. Para isso, na Figura AP 52 I, são extraídos os pontos de controle (*CP*) da estrela e removidos os pontos duplicados (*Sort Points*). Esses pontos são utilizados como referência para, por meio do componente *MIndex*, buscar seus índices na lista total de pontos (Figura AP 52 J). Com os índices dos pontos de controle, os mesmos valores são utilizados para remover as células correspondentes na lista de células (*Cull i*), resultando num conjunto de polígonos conforme a Figura AP 52 K.

Por fim, na etapa 5.5 o mesmo processo é realizado para remover a célula central da estrela (Figura AP 52 L): encontra-se o índice da célula ($MIndex$) na lista de pontos e, em seguida, remove-se a célula correspondente ($Cull i$). Ao final desta etapa, obtém-se os polígonos que configuram as células hexagonais dispostas em um plano (XY), para que, a seguir, seja configurada e aplicada a simulação das forças físicas.

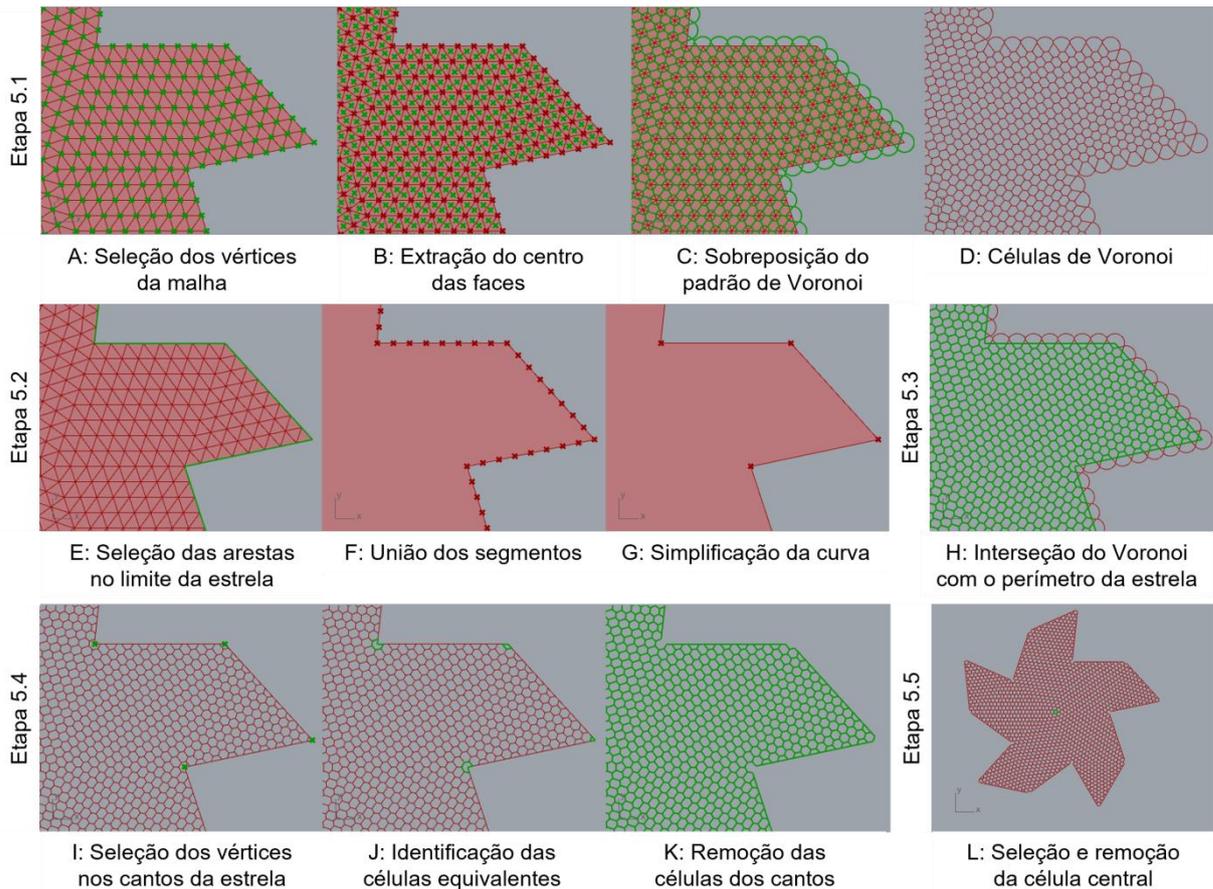


Figura AP 52 Representação gráfica da etapa 5 do modelo da Shellstar.

Fonte: Elaboração própria.

Para a simulação das forças físicas, é necessário abordar a geometria como uma malha. Então, na Figura AP 53 estão a programação e estrutura do saber referente às transformações da geometria para obtenção da malha e seu tratamento (extração de elementos) para a simulação, como definição de parâmetros da deformação da malha, tal como a elasticidade e seus pontos de fixação.

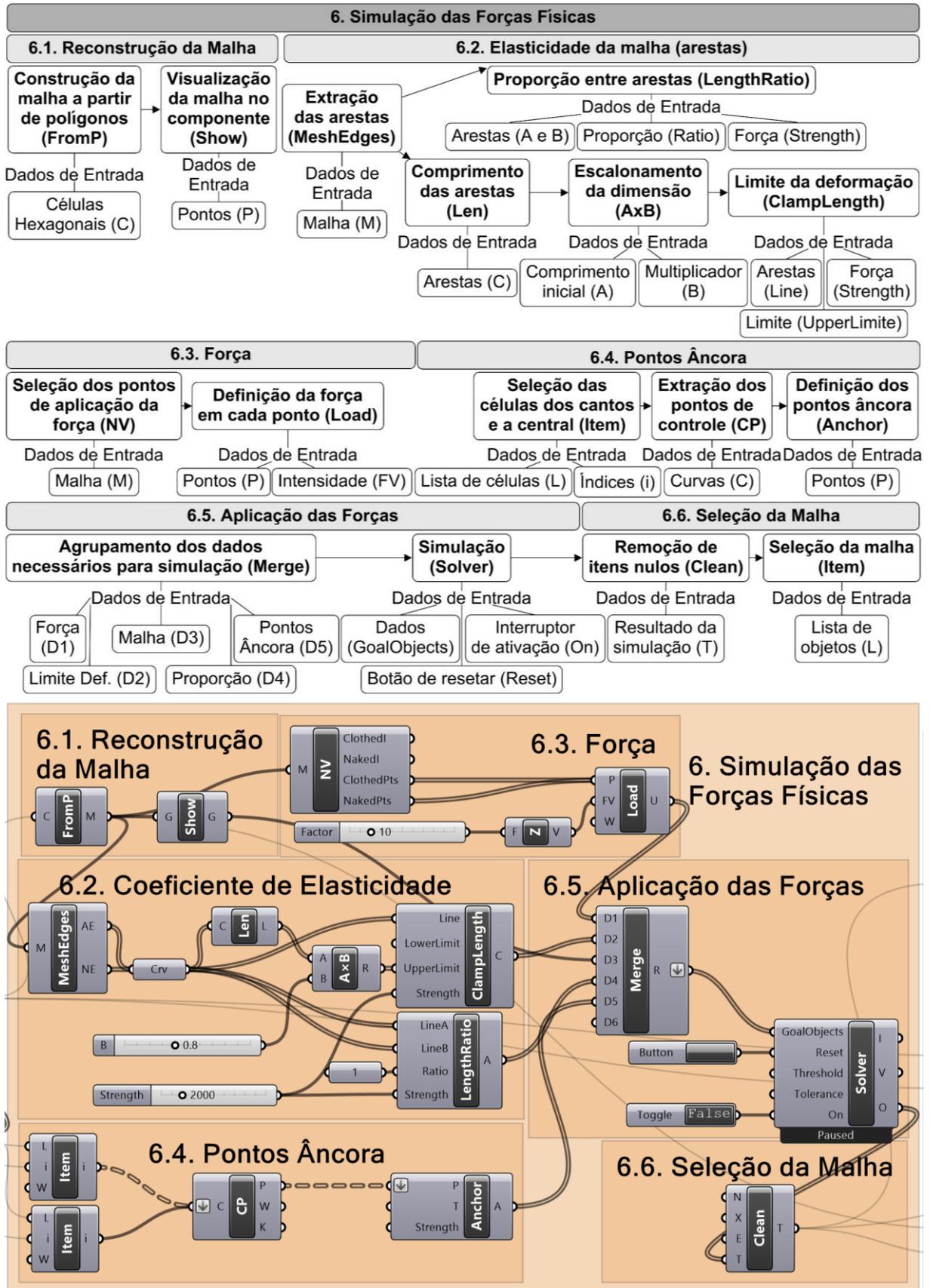


Figura AP 53 Esquema visual da etapa 6 da modelagem da Shellstar.
 Fonte: Elaboração própria.

Então, na etapa 6.1 (Figura AP 54 A), os polígonos são transformados em faces de malha (*FromP*). Também é aplicado um componente de visualização da malha no processo de simulação (*Show*), responsável por representar a malha no espaço tridimensional durante suas deformações físicas, em tempo real.

Além disso, é necessário configurar a deformação da malha para a simulação das forças físicas. Na etapa 6.2, um conjunto de componentes é aplicado para caracterizar o "coeficiente de elasticidade" como uma propriedade da malha, representando a capacidade de ela se deformar e retornar ao estado original. Utiliza-se o componente *MeshEdges* para extrair as arestas (Figura AP 54 B), incluindo as arestas internas das faces *NGon* – ou seja, a triangulação das faces hexagonais. Depois, são aplicados dois componentes para a elasticidade dessas arestas: o primeiro garante que permaneçam dentro de um limite estabelecido (*ClampLength*) e o segundo mantém uma proporção entre elas (*LengthRatio*).

No primeiro caso, é necessário definir o limite e, como existe somente uma força que tende a esticar a malha, é estabelecido apenas o limite superior (*UpperLimit*) para a deformação das arestas a partir de um multiplicador (*AxB*) de seu comprimento original (*Len*). O segundo componente serve para atribuir a proporção entre as arestas, neste caso uma relação (*Ratio*) de 1:1, o que tende a manter uma única dimensão entre elas. Nesse sentido, para abordar as informações equivalentes durante a simulação, é necessário estabelecer a força desses dados (*Strength*). Ou seja, definir uma hierarquia entre as informações para que o plugin Kangaroo consiga atribuir uma ordem de importância para as informações.

Essa abordagem digital das forças físicas é uma referência aos arquitetos como Gaudí, que prendiam cordas pelas extremidades e as deixavam submetidas sob a ação da gravidade. Para replicar isso, a força da gravidade é simulada no sentido oposto e também são estabelecidos pontos de fixação da malha.

Na etapa 6.3, que define a força aplicada, o componente de força (*Load*) tem como dado de entrada os pontos que compõem a malha (*P*) e o vetor da força (*FV*). Os pontos são obtidos pelo componente *NV* (*Naked Vertices*), que extrai os vértices da malha (Figura AP 54 C). E para o vetor - que na simulação está representando a direção e a intensidade da ação da força da gravidade - insere-se um controle numérico deslizante (*Number Slider*). Sua direção é definida em Z com o

componente de vetor unitário (unit Z) e o valor simplificado para 10 (apesar de o arredondamento da intensidade da gravidade ser convencionado em 9.8).

Na etapa 6.4, os pontos de ancoragem (*Anchor*) são estabelecidos selecionando-se as células dos cantos da estrela (*Item*) e a célula central (*Item*), conforme a Figura AP 54 D. Depois, são extraídos seus pontos de controle (*CP*), como demonstrado na Figura AP 54 E. Esses pontos são pontos de fixação da geometria durante a simulação, ou seja, os pontos de ancoragem da malha.

Na etapa 6.5, os dados físicos gerados nas etapas 6.1 a 6.4 são agrupados (*Merge*) e servem como entrada para o componente de simulação das forças físicas (*Solver*). Na etapa 6.6, os resultados são filtrados para remover dados nulos (*Clean*) e selecionar apenas a malha (*Item*). Ao final da etapa 6, tem-se a malha deformada pelas forças físicas (Figura AP 54 F).

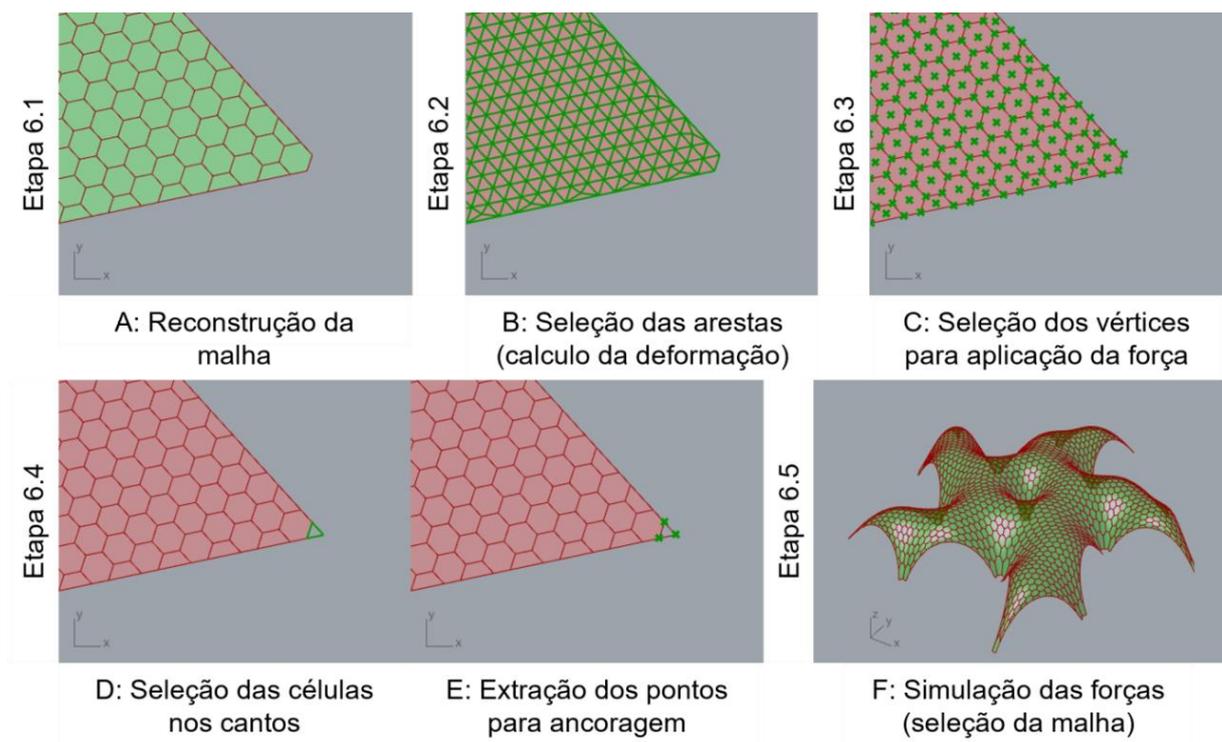


Figura AP 54 Representação gráfica da etapa 6 do modelo da Shellstar.
Fonte: Elaboração própria.

No processo de projeto de Matsys (c2022), isso seria encaminhado para a otimização da superfície/célula. No entanto, para essa pesquisa, avança-se diretamente para as questões de iluminação, a partir da perfuração das células. Esse processo está descrito na estrutura de saber na Figura AP 55.

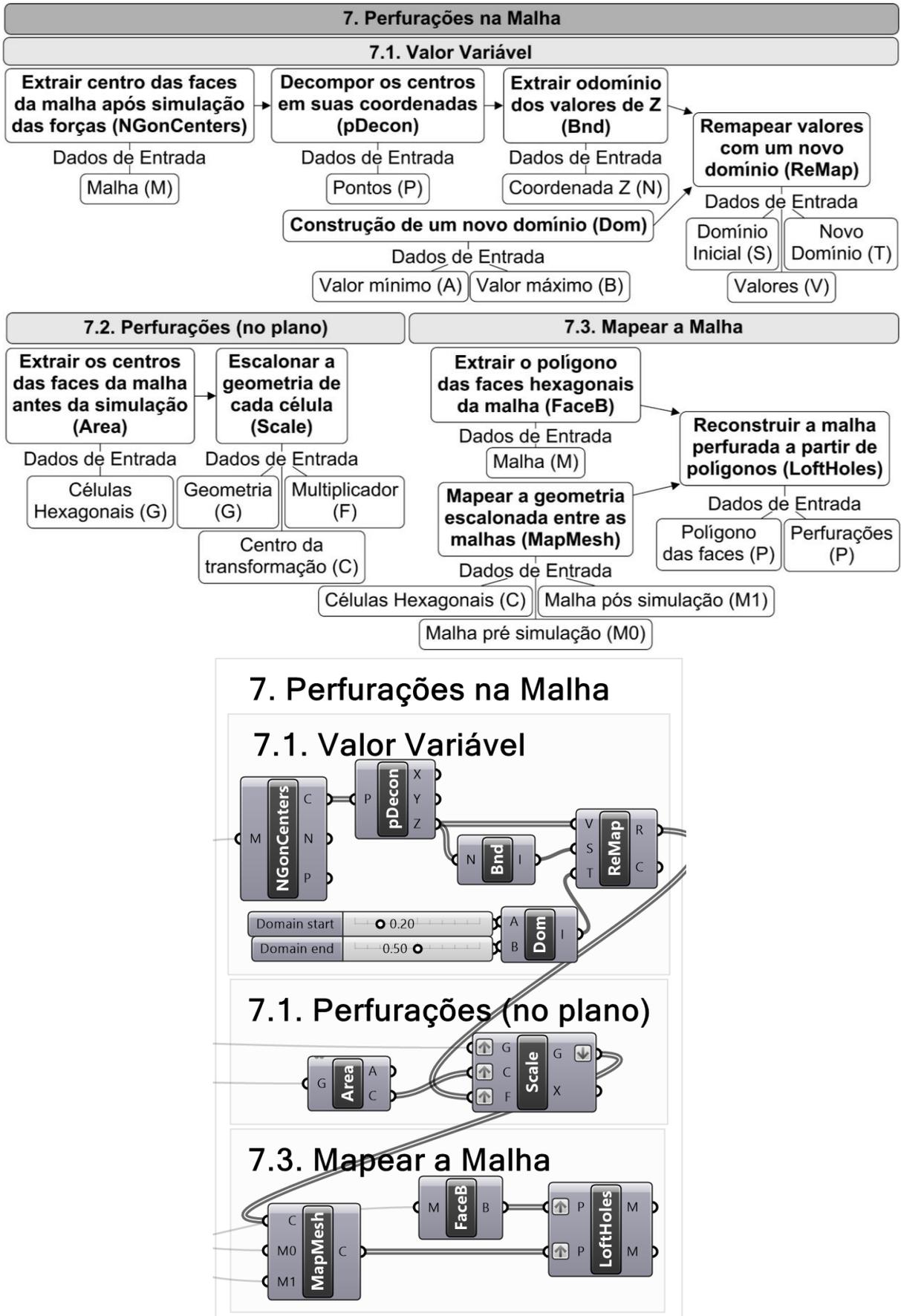


Figura AP 55 Esquema visual da etapa 7 da modelagem da Shellstar.
 Fonte: Elaboração própria.

Na Figura AP 56 são apresentadas as etapas de configuração das perfurações na malha da Shellstar.

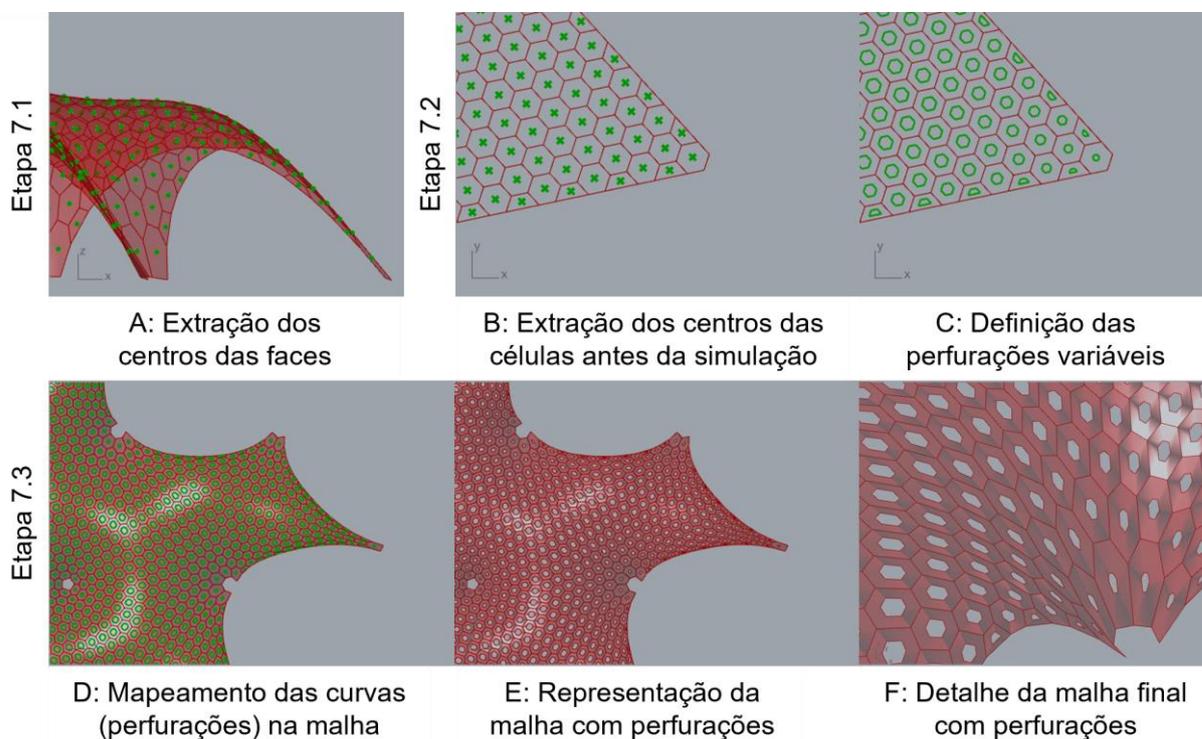


Figura AP 56 Representação gráfica da etapa 7 do modelo da Shellstar.

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com as informações fornecidas e para atender aos critérios estabelecidos por Matsys (c2022), não são adotadas perfurações de mesmo tamanho para todas as células hexagonais, principalmente por questões estruturais. Em vez disso, é realizado um processo para determinar a dimensão das perfurações que considera a altura que as faces dos hexágonos se encontram em relação ao plano do chão. Essa associação visa otimizar a distribuição da iluminação natural e garantir um equilíbrio entre as necessidades estruturais e as intenções de design arquitetônico.

No processo de determinação das dimensões das perfurações nas células hexagonais do pavilhão Shellstar, a primeira etapa consiste em extrair os centros das faces dos hexágonos (*NGonCenter*), conforme destacado na Figura AP 56 A. Após, esses pontos são decompostos em suas coordenadas (*pDecon*) para selecionar as coordenadas que definem a altura (*Z*). Os valores das alturas são ordenados para determinar o domínio inicial (*Bnd*), que indica o intervalo de variação das alturas. Também é construído um novo domínio (*Dom*) que define o limite

máximo e mínimo desejado para as perfurações. Esses domínios são utilizados juntamente com a lista de coordenadas Z como dados de entrada para o componente responsável por remapear os valores (*ReMap*). Nesse processo, a lógica é que quanto maior for a altura do ponto (sua coordenada Z), maior será a dimensão da perfuração, proporcionando uma variação adequada para a estabilidade estrutural do pavilhão.

Em seguida, é realizado o ajuste de escala das células hexagonais (*Scale*), enquanto ainda estão no plano (antes da simulação). Nessa etapa são utilizados três dados de entrada. O primeiro dado inserido são os polígonos que compõem as células hexagonais antes da aplicação das forças físicas (G). O segundo conjunto de dados é formado pelo centro dessas células (C), que são obtidos por meio do componente Area (representado na Figura AP 56 B). Por fim, o terceiro dado de entrada é o fator de escalonamento (F), que é o resultado do remapeamento das alturas para um novo intervalo, determinado anteriormente. Como resultado, têm-se as perfurações ainda no plano (Figura AP 56 C), mas que seguem a lógica de quanto mais alta está a face (equivalente da malha após simulação), maior será a dimensão da perfuração correspondente.

Na etapa 7.3, o objetivo é mapear as perfurações no espaço tridimensional, uma vez que elas foram inicialmente construídas na malha plana em XY. Para isso, as células que estão no plano do chão pertencem à primeira malha, ou a malha inicial (M0). Essas faces são correlacionadas com as células da malha final (M1), ou seja, aquela resultante da simulação das forças físicas. Essa associação entre as malhas inicial e final ocorre por intermédio do componente *MapMesh* (Figura AP 56 D). Além dessas geometrias, também são inseridos os polígonos que representam as perfurações (C). Isso resulta na definição das perfurações no espaço, ou seja, a localização dos polígonos que as representam (Figura AP 56 D). Para reconfigurar a malha (*LoftHoles*), insere-se os polígonos que representam as faces (extraídos da malha simulada por meio do componente *FaceB*) e os polígonos que representam suas perfurações. O componente realiza a diferença entre esses polígonos, resultando em uma malha com as perfurações (Figura AP 56 E e, em detalhe, na Figura AP 56 F).