

Aplicação de malhas na arquitetura: a estrutura de saber que envolve o Projeto Éden

Application of meshes in architecture: the structure of knowledge that involves the Eden Project

Aplicación de mallas en arquitectura: la estructura de conocimiento que envuelve el Proyecto Edén

Fernando Franz Zauk

Mestrando, PROGRAU-UFPeI, Brasil
ferzauk@gmail.com

Janice de Freitas Pires

Professora Doutora, PROGRAU-UFPeI, Brasil.
janicepires@gmail.com

RESUMO

O conhecimento da geometria (complexa) tem sido utilizado por arquitetos ao longo do tempo como recurso para o desenvolvimento de soluções integradas e otimizadas em arquitetura. Na atualidade esta abordagem no processo projetual tem sido efetivada por meio do projeto paramétrico, permitindo que os arquitetos explorem uma série de variáveis, tais como condições climáticas, materiais de construção e sistemas de iluminação, para encontrar a melhor solução para o projeto em questão, visando até mesmo projetos mais sustentáveis e eficientes. O objetivo principal do artigo é promover e potencializar o ensino de arquitetura, destacando a importância da articulação entre os saberes, da modelagem e da geometria associada com obras de arquitetura voltadas a sustentabilidade. Especificamente busca-se compreender a integração dos conceitos geométricos em projetos paramétricos contemporâneos que envolvam o uso de malhas, explorando um caso de arquitetura, o projeto Éden, e sua relação com a geometria construtiva na arquitetura. A partir dos discursos dos responsáveis pelo projeto, explicita-se o saber envolvido por intermédio de esquemas descritivos e visuais e estruturam-se processos de modelagem paramétrica, para constituir uma estrutura integral do saber, explícita e acessível, nos termos da Teoria Antropológica de Chevallard.

PALAVRAS-CHAVE: Malhas. Geometria otimizada. Projeto paramétrico.

ABSTRACT

Knowledge of (complex) geometry has been used by architects over time as a resource for the development of integrated and optimized architectural solutions. Currently, this approach in the design process has been carried out through parametric design, allowing architects to explore a series of variables, such as climatic conditions, building materials and lighting systems, to find the best solution for the project in question, even more sustainable and efficient projects. The main objective of the article is to promote and enhance the teaching of architecture, highlighting the importance of articulation between knowledge, modeling and geometry associated with architectural works aimed at sustainability. Specifically, we seek to understand the integration of geometric concepts in contemporary parametric projects that involve the use of meshes, exploring an architectural case, the Éden project, and its relationship with constructive geometry in architecture. From the speeches of those responsible for the project, the knowledge involved is made explicit through descriptive and visual schemes and parametric modeling processes are structured, to constitute an integral structure of knowledge, explicit and accessible, in the terms of Chevallard's Anthropological Theory.

KEYWORDS: Meshes. Optimized geometry. Parametric design.

RESUMEN

Los arquitectos han utilizado el conocimiento de la geometría (compleja) a lo largo del tiempo como un recurso para el desarrollo de soluciones arquitectónicas integradas y optimizadas. Actualmente, este enfoque en el proceso de diseño se ha llevado a cabo a través del diseño paramétrico, lo que permite a los arquitectos explorar una serie de variables, como las condiciones climáticas, los materiales de construcción y los sistemas de iluminación, para encontrar la mejor solución para el proyecto en cuestión, aún más sostenible y proyectos eficientes. El objetivo principal del artículo es promover y potenciar la enseñanza de la arquitectura, destacando la importancia de la articulación entre conocimientos, modelado y geometría asociados a las obras arquitectónicas encaminadas a la sostenibilidad. Específicamente, buscamos comprender la integración de conceptos geométricos en proyectos paramétricos contemporáneos que involucran el uso de mallas, explorando un caso arquitectónico, el proyecto Éden, y su relación con la geometría constructiva en arquitectura. A partir de los discursos de los responsables del proyecto, se explicitan los saberes involucrados a través de esquemas descriptivos y visuales y se estructuran procesos de modelado paramétrico, para constituir una estructura integral de saberes, explícitos y accesibles, en los términos de la Teoría Antropológica de Chevallard.

PALABRAS-CLAVE: Mallas. Geometría optimizada. Diseño paramétrico.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Buckminster Fuller, arquiteto americano pioneiro em manifestar, ainda na primeira metade do século XX, preocupações relacionadas com a sustentabilidade, a arquitetura desempenha um papel crucial na elevação do estado da humanidade e na promoção de sua administração responsável do meio ambiente (LANGDON, 2014). Ele considerava que apenas os arquitetos possuíam a capacidade de entender e navegar pelas complexas inter-relações entre sociedade, tecnologia e meio ambiente, conforme o paradigma da teoria dos sistemas. Neste contexto, Fuller utilizava uma visão geométrica para desenvolver suas soluções projetuais. Ele introduziu o termo 'sinérgica' e o definiu como um sistema para interpretar matematicamente as estratégias estruturais da natureza (BERTOL, 2011). Assim, se dedicou a estudar de maneira integrada a complexidade espacial da arquitetura, reconhecendo que a geometria é a ponte entre a matemática e a realidade, o que o levou a se inspirar na natureza como uma importante fonte de conhecimento (EDMONDSON, 1987).

Este arquiteto introduziu na arquitetura a noção de sustentabilidade ao utilizar uma estrutura em forma de geodésica, formada por uma estrutura de malha com faces triangulares, resultante da subdivisão de uma esfera. Seu objetivo era otimizar o projeto a partir da eficiência material, integridade estrutural e modularidade, além de racionalizar o processo de produção e construção em arquitetura, para uma intervenção de design sustentável e facilmente replicável. A proposta de Fuller tem seus princípios baseados na maneira em que a natureza desenvolve suas soluções formais, ou seja, sempre buscando otimizar o gasto de energia e gerando estruturas altamente equilibradas. Embora o arquiteto não tenha alcançado seu objetivo de tornar esta estrutura altamente replicável, suas ideias foram fundamentais para impulsionar, na segunda metade do século XX, a adoção da abordagem sustentável na arquitetura (LANGDON, 2014).

Diferentemente da maneira analógica desenvolvida por Fuller, a arquitetura atual tem a oportunidade de abordar tais saberes de maneira integrada a partir dos meios digitais de representação, com o objetivo de desenvolver projetos otimizados e sustentáveis. Isto exige que os arquitetos lidem com novos dados que não são considerados no processo tradicional de desenvolvimento do projeto (PETERS, 2011). Tais como as questões relacionadas ao desempenho da arquitetura - estrutura, eficiência energética, exposição solar e acústica - que são tradicionalmente estudadas após a definição da forma arquitetônica (ASANOWICZ, 2017). No entanto, o mesmo autor argumenta que abordar individualmente cada requisito de otimização acaba sendo ineficiente, considerando o tempo de investimento e principalmente o potencial para atingir um resultado altamente eficiente. O ambiente de projeto paramétrico permite o desenvolvimento de soluções projetuais totalmente integradas e otimizadas, em que os modelos são gerados automaticamente depois de atender todas as demandas impostas, reduzindo o tempo e o ciclo de otimização (ASANOWICZ, 2017).

O projeto paramétrico é um processo de investigação formal que utiliza diferentes variáveis para gerar um modelo em que a premissa principal não está inicialmente na forma arquitetônica em si, mas na declaração de seus parâmetros que resultam em uma configuração da forma (PAZINI; MUSSI, 2019). No entanto, embora os parâmetros sejam a essência do projeto paramétrico, é a geometria que configura a forma arquitetônica (ASANOWICZ, 2017; PAZINI; MUSSI, 2019). Portanto, é importante considerar o conhecimento em geometria, como abordado não somente por Fuller, mas por outros arquitetos do passado.

Antoni Gaudí foi um dos expoentes no desenvolvimento de formas geométricas otimizadas baseadas no conhecimento das superfícies curvas, principalmente as superfícies retilíneas não planificáveis, que possuem dupla curvatura e, conseqüentemente, apresentam propriedades de desempenho estrutural. Apesar de explorar amplamente tais geometrias em suas obras, Gaudí também empregou técnicas de busca de formas, a partir de modelos analógicos - conhecidos como modelos de catenária (BURRY; BURRY, 2010), configurados por meio de uma rede flexível em malha.

Com vistas ao ensino de arquitetura, busca-se explicitar o saber integrado na abordagem sustentável do projeto, relacionado à geometria que o define, a partir de um exemplo de arquitetura referencial que emprega modelo em malha para gerar uma estrutura otimizada. Adota-se o projeto Éden para este estudo devido a sua referência a Biosfera de Montreal, de Buckminster Fuller.

Tem-se o propósito de abordar particularmente questões que vão além das soluções geométricas específicas das situações arquitetônicas, mas também promover um maior entendimento da geometria associada aos requisitos projetuais, como ocorre com a sustentabilidade, com intuito de sua transposição ao ensino de arquitetura. Por ser uma abordagem voltada para o ensino, sua importância está na integração do saber geométrico com os propósitos da sustentabilidade, por meio da abordagem paramétrica, constituindo-se como um meio de explicitar o saber subjacente ao projeto arquitetônico para a formação dos futuros arquitetos.

2 METODOLOGIA

Para atingir o objetivo da pesquisa, de compreender e explicitar a integração dos conceitos geométricos em projetos paramétricos contemporâneos que envolvam o uso de malhas na prática profissional e no ensino de arquitetura, analisam-se casos referenciais de projeto. Neste trabalho, sistematiza-se o estudo de um destes projetos, uma vez que na revisão de literatura da pesquisa identificou-se a relação que o Projeto Eden possui com a abordagem da sustentabilidade.

A metodologia parte da análise de fontes de dados apresentadas nos discursos de arquitetos responsáveis pelos projetos, além de sites e obras literárias de arquitetos e pesquisadores, a fim de investigar a estrutura de saber, nos termos de Yves Chevallard (1999), presente na aplicabilidade das malhas do Projeto Eden. Este autor destaca que um saber possui uma praxeologia, que é a própria estrutura lógica da ação humana. Nesse sentido, um saber está estruturado a partir de quatro elementos principais: uma tarefa ou conjunto de tarefas/problemas a resolver; as técnicas de resolução (a maneira de resolver); as tecnologias que justificam explicam as técnicas; e as teorias, que justificam e explicam as tecnologias, abrangendo um nível mais profundo de explicação. Estes elementos caracterizam o bloco prático (técnicas e tecnologias) e bloco teórico (tecnologias e teorias) desta estrutura.

A partir de tal referencial, explicitam-se o processo de projeto e os conceitos e termos relacionados à estrutura geométrica dessa obra. Para promover a integração entre o saber teórico e prático, desenvolve-se a modelagem paramétrica da geometria do projeto em questão, com o intuito de potencializar a estrutura de saber identificada. Essas diferentes abordagens serão consideradas para então se constituir como uma estrutura integral do saber, conforme postula a noção estruturada de saber proposta por Chevallard (1999), em que o saber se

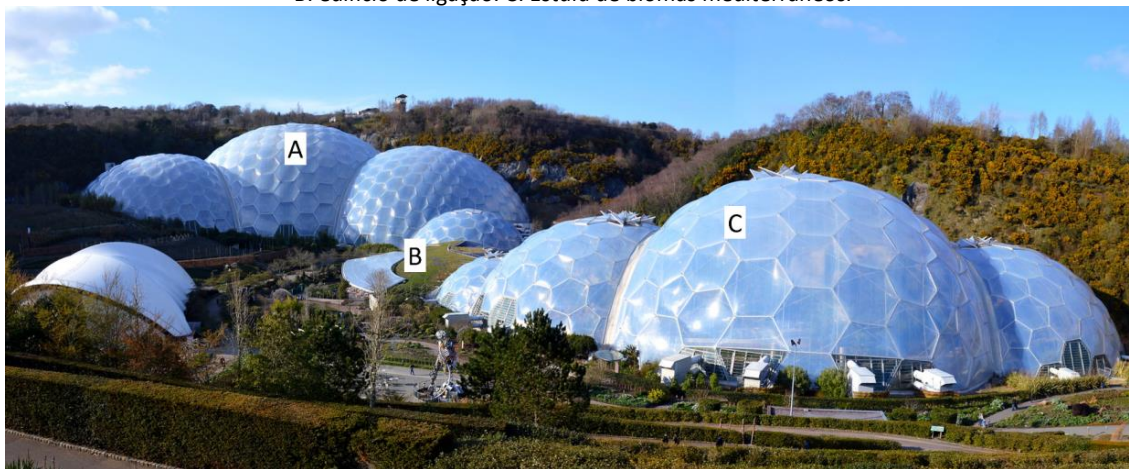
comporta como um objeto dinâmico e passível de transformações de acordo com o contexto em que é aplicado.

Considera-se que a transposição do saber teórico associado a aplicação de malhas na arquitetura (para a configuração de geometrias complexas) pode ser alcançada por meio da explicitação dos conceitos e técnicas envolvidos na programação visual resultante do desenho paramétrico da obra arquitetônica estudada. Por fim, apresenta-se a sistematização dos elementos de saber a partir de esquemas visuais em forma de mapas conceituais.

3 TEORIAS E TÉCNICAS PRESENTES NO PROJETO ÉDEN

A importância do Projeto Eden está no momento em que foi inaugurado, em 2001, sendo 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 Eden é a maior estufa do mundo (LARSEN; TYAS, 2016) e juntamente com sua área externa de 15 hectares, exibem vegetações de diferentes zonas climáticas (KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, 2002). Localizado em Cornwall, na Inglaterra, o Projeto Eden (Figura 1) 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 1 Vista do Projeto Eden, em Cornwall, na Inglaterra. A: Estufa de biomas tropicais úmidos. B: edifício de ligação. C: Estufa de biomas mediterrâneos.



Fonte: Modificado a partir de Pittman (2015).

De acordo com Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002), o complexo era composto apenas por quatro edificações no momento de sua inauguração. A primeira a ser construída, localizada na parte mais alta do terreno, abriga o centro de visitação e serve como entrada para o complexo. Essa edificação agrupa atividades como loja de souvenir, restaurantes e exposições. As outras três edificações formam a construção principal do complexo e estão representadas na Figura 1: a maior estufa abriga os Biomas de Trópico Úmido (A); o edifício de ligação, quase invisível na superfície devido à sua cobertura revestida com grama (B); e, por fim, a estufa dos Biomas de Temperatura Quente (C).

O programa do Eden Project teve sua origem na ideia de Tim Smit, o fundador do projeto, que desejava criar uma estrutura impressionante para abrigar uma ampla variedade de plantas e conscientizar as pessoas sobre a biodiversidade (LARSEN; TYAS, 2016). Embora as

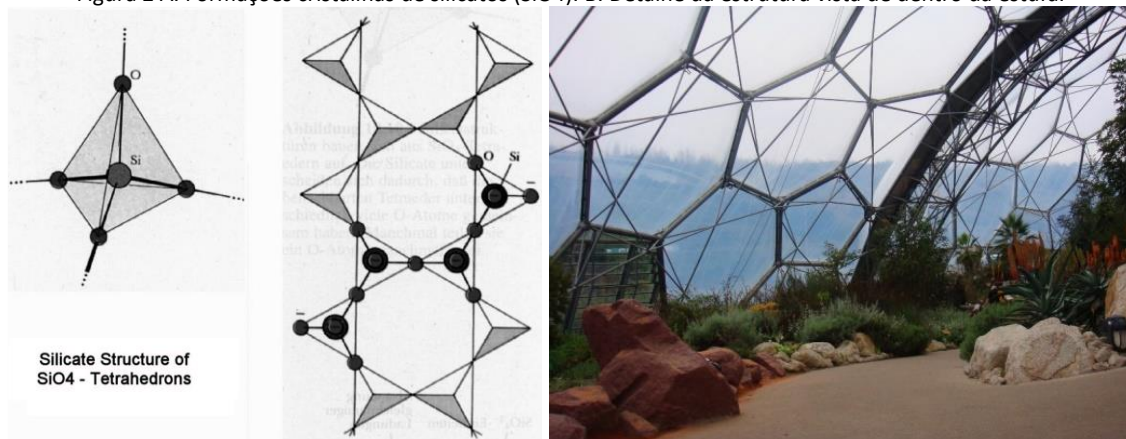
intenções fossem grandiosas, os autores afirmam que, inicialmente, não havia investimento, projeto e nem mesmo um terreno definido para o programa. Portanto, os arquitetos e engenheiros responsáveis precisavam criar rapidamente uma proposta de projeto que fosse econômica, adaptável às variações do solo (já que o terreno ainda não havia sido adquirido), mas que pudesse chamar a atenção dos investidores.

Segundo Eden (2022), a referência utilizada para solucionar o problema do terreno é a bolha de sabão, pois se adaptam a qualquer superfície, enquanto que, arquitetonicamente, apoiam-se no sistema de geodésicas do arquiteto americano Buckminster Fuller, responsável pelo projeto da Biosfera de Montreal. Isso porque a geometria da geodésica proporciona uma estrutura leve, ao mesmo tempo em que maximiza a superfície dos domos. Dessa forma, a equipe de projeto aproveita a eficiência da Biosfera, mas com uma abordagem mais orgânica, através 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 trouxe complexidade para as soluções estruturais do projeto. Então os responsáveis definem os domos geodésicos como alternativa para uma solução mais adaptável as superfícies (topografia) irregulares do solo sem a necessidade de alterar o tipo de estrutura do projeto (LARSEN; TYAS, 2016). Isto por que os domos podem ser criados com seções diferentes para se adaptarem as 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.

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 a flexão (LARSEN; TYAS, 2016).

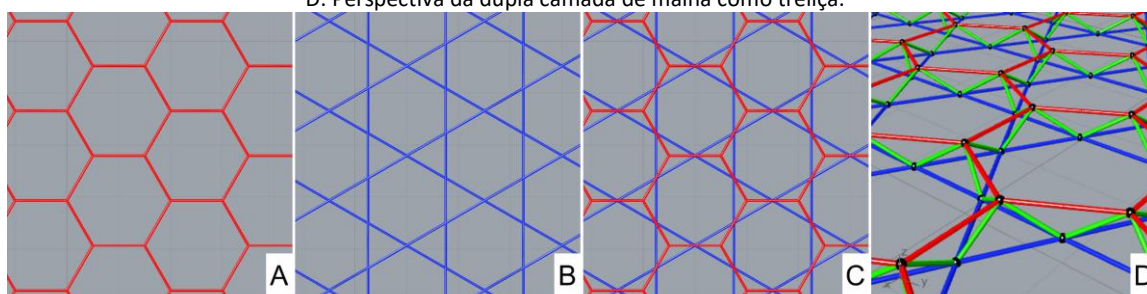
Porém, enquanto que no projeto de Fuller as camadas são compostas por polígonos duais (uma camada apresenta hexágonos e a outra triângulos), as duas malhas presentes no Projeto Eden não tem a mesma relação entre as camadas. Segundo Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002), o arranjo geométrico da malha presente no Projeto Eden apresenta propriedades oriundas das formações cristalinas de silicatos (Figura 2A), como o menor caminho de transmissão de energia e o menor consumo material possível. Dessa maneira, a geometria das cúpulas do Eden torna-se economicamente viável e, ao mesmo tempo, visualmente atrativa. O resultado disso pode ser visto na Figura 2B, em que é possível perceber a diferença entre as duas camadas, sendo a interna composta por elementos mais delgados.

Figura 2 A. Formações cristalinas de silicatos (SiO_4). B. Detalhe da estrutura vista de dentro da estufa.

Fonte: Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002) e Saeedi (2013).

A camada externa é hexagonal (em vermelho na Figura 3), 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 3) têm seus vértices posicionados na projeção dos pontos médios das arestas dos hexágonos que formam a camada externa (Figura 3C). 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 3C). Por isso que a camada interna (azul) possui um padrão formado por uma composição de triângulos e hexágonos (Figura 3B), sendo chamada de "Tri-Hex-Net" (KNEBEL; SANCHEZ-ALVAREZ; ZIMMERMANN, 2002).

Figura 3 Padrões geométricos presentes nas malhas do Projeto Eden. 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 a transmissão de carga tridimensional. Na Figura 3D 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.

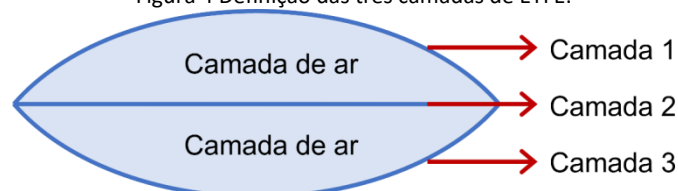
Apesar de essa estratégia aumentar o número de conexões (nós destacados em preto na Figura 3D), por conectar as duas camadas de malhas, uma de suas consequências é a diminuição do diâmetro dos tubos (de 500mm para 200mm) e redução o peso total da estrutura (aproximadamente 50%), provocando uma diminuição 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, 2022).

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). Entretanto, 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 por que as geodésicas possuem tamanhos diferentes e, portanto, não conseguem se estabilizar uma com as outras. Além disso, suas posições e frequências também variam, o que resulta em uma padronização desconhecida entre as geodésicas (LARSEN; TYAS, 2016). Embora os responsáveis tenham tentado reorganizar o padrão externo para acomodar os hexágonos, a solução final se apoia na visão de que a geometria não precisa estar em um estado de solução perfeita (LARSEN; TYAS, 2016). Isso quer dizer os painéis não são contínuos na transição entre as geodésicas, havendo uma interrupção no ponto em que a viga (arco) é aplicada, resultando em um corte na camada hexagonal.

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. 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 consequente diminuição da estrutura metálica, mas também possibilita uma maior entrada dos raios UV nas cúpulas e um bom isolamento térmico. São utilizadas, então, três camadas finas desse composto (Figura 4), garantindo um alto desempenho, eficiência e que, por estar inflado, se apresenta como uma superfície máxima para um perímetro mínimo (GRIMSHAW, 2022). Dessa maneira, os hexágonos são compostos por duas almofadas em forma de lentes convexas (Figura 4), 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).

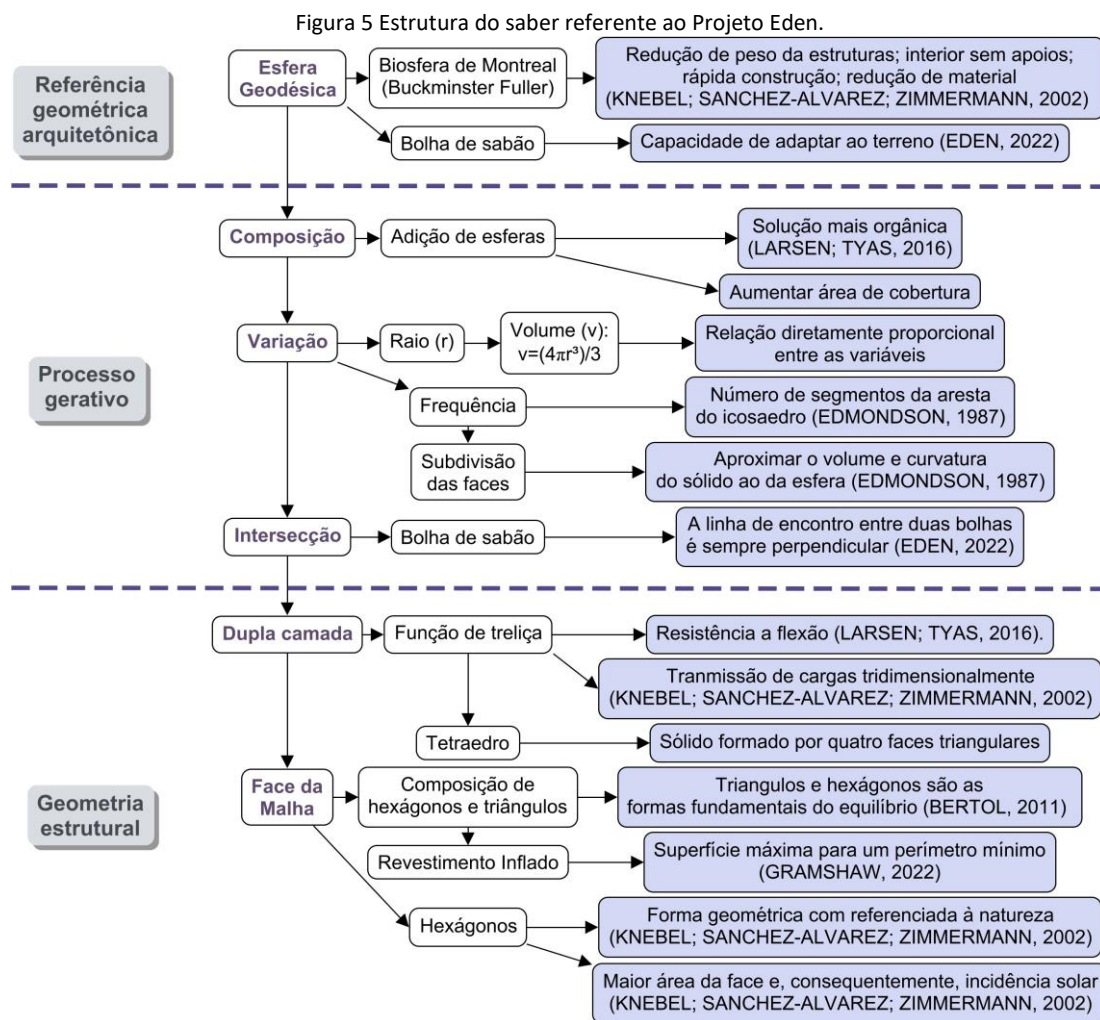
Figura 4 Definição das três camadas de ETFE.



Fonte: Elaboração própria.

Os painéis de ETFE parecem opacos quando vistos do exterior, mas se revelam quase transparentes quando observados internamente (LARSEN; TYAS, 2016). Essa característica, combinada com a grandeza das estufas e a altura do telhado, produz uma sensação de imersão que faz com que os usuários esqueçam que estão em uma edificação e sintam-se de fato em uma floresta (LARSEN; TYAS, 2016). Segundo Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002), essa abordagem estrutural atendeu aos requisitos do projeto: redução de peso e quantidade de aço, entrada de luz solar através de um revestimento transparente, um interior livre de apoios, uma forma atraente, uma estrutura econômica e rápida de construir.

O esquema da Figura 5 explicita os conceitos geométricos e arquitetônicos identificados nos discursos até o momento. No eixo 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 são apresentadas as especificidades de cada conceito/etapa de geração, incluindo-se as descrições e justificativas na arquitetura.

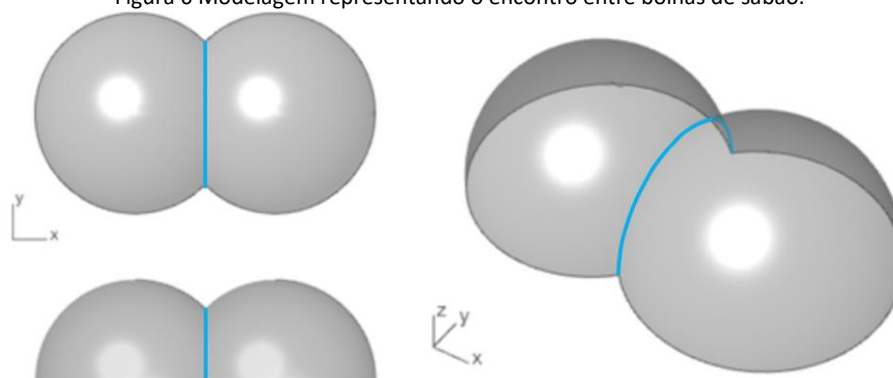


Em relação à Biosfera, a estrutura de saber do Projeto Eden diferencia-se ao abordar uma composição de esferas geodésicas por adição de novos elementos. Além disso, propriedades como raio e frequência são diferentes para cada uma das esferas geodésicas da composição. Isso permitiu que o projeto se adequasse 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 6) é sempre perpendicular ao plano em que estão apoiadas (EDEN, 2022).

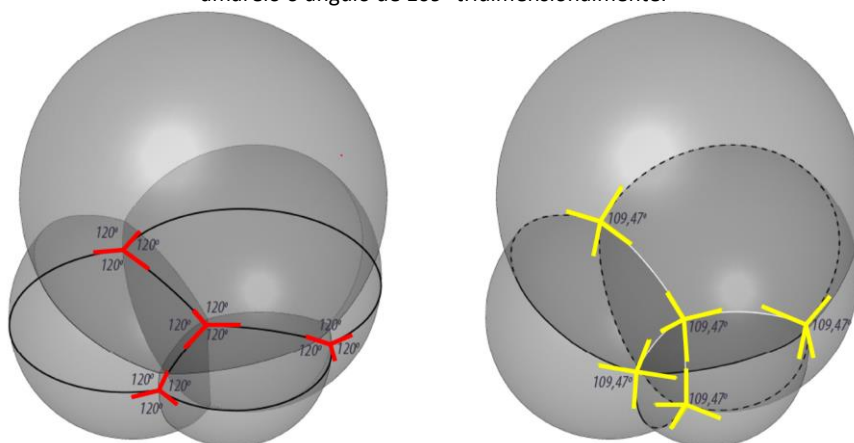
Figura 6 Modelagem representando o encontro entre bolhas de sabão.



Fonte: Elaboração própria.

Quanto ao arranjo entre as bolhas, Joseph Plateau percebeu que a organização ideal, no plano bidimensional, o ângulo aproxima-se de 120° (linhas vermelhas na Figura 7). No espaço tridimensional, as curvas de interseção entre as bolhas (linhas amarelas na Figura 7) aproximam-se dos 109° presentes no tetraedro (BERTOL, 2011).

Figura 7 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 é reforçada pela aplicação estrutural da dupla camada de malha, pois as arestas que conectam as camadas formam um tetraedro em cada vértice dos hexágonos da camada externa, como mencionado anteriormente. Isso torna a estrutura do Projeto Eden mais semelhante àquela encontrada na Biosfera, especialmente considerando que a geodésica de Fuller foi utilizada como ponto de partida. No entanto, é importante destacar

que a estrutura do Projeto Eden é mais complexa geometricamente devido ao arranjo entre as geodésicas e à configuração das malhas da estrutura.

Em relação às classificações das faces da malha, amplia-se sua compreensão quando observadas no Projeto Eden (Quadro 1). Em um primeiro momento, durante a revisão de literatura, foi identificada uma repetição de hexágonos no envoltório das estufas, caracterizando a geometria como regular. No entanto, após análise do projeto, identificou-se a presença de uma segunda camada, não visível nas fotografias tomadas do exterior do edifício, com faces formadas pela combinação de dois polígonos regulares, o hexágono e o triângulo. Portanto, passa-se a classificar a malha do Projeto Eden como regular (hexágonos) na sua camada externa e semi regular (hexágonos e triângulos) na camada interna.

Quadro 1 Classificação do Projeto Eden 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.

Referente à função da malha, confirmam-se as identificadas inicialmente, como descrito no Quadro 2. A primeira é o uso computacional que não estava presente na origem da geodésica do projeto de Fuller, mas que foi justificado no Éden devido ao prazo restrito para a finalização do projeto e definição de sua geometria. Além disso, a malha como um sistema de organização do projeto ajudou a consolidar a proposta das geodésicas entre os responsáveis e também entre os investidores. Isso por que forneceu uma alternativa para as constantes modificações no terreno, já que os elementos da geometria (nós e arestas) poderiam ser fabricados em excesso para as adaptações do projeto ao local, consolidando a proposta.

Outra aplicação identificada para a estrutura de saber do Projeto Eden é a tesselação. Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002) acreditam que tal aplicação esteja configurada quando ocorre a etapa de subdivisão do icosaedro, que dá origem à geodésica, como uma transformação do sólido em uma malha. Então, apesar de não existir uma etapa específica de transformação de uma superfície em malha durante o desenvolvimento do Projeto Eden, sua classificação quanto a tesselação está integrada na origem de sua geometria, já que se apoia nas geodésicas de Fuller para definição da forma.

Por fim, a malha também integra a solução estrutural do projeto, uma vez que, segundo Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmermann (2002), os elementos estruturais na primeira proposta de projeto eram arcos assimétricos os responsáveis pela transmissão de cargas, solução que foi repensada quando a malha passou a ser considerada uma alternativa projetual. Nesse sentido, adotar a dupla camada de malha permitiu reduzir a dimensão das peças (arestas) e, conseqüentemente, reduzir o peso próprio da estrutura. Além disso, tal estratégia garantiu uma maior estabilidade para a estrutura.

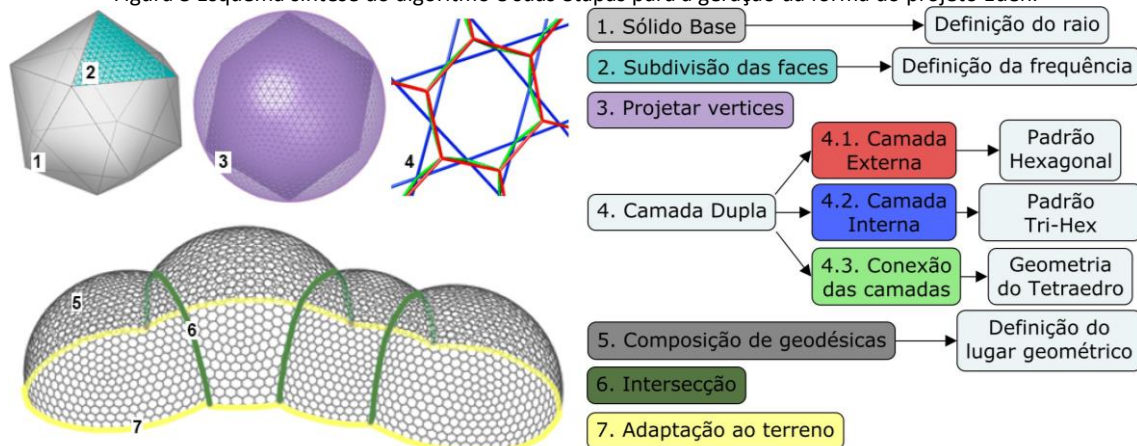
Quadro 2 Função da malha no Projeto Eden

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 partir de um esquema visual e descritivo (Figura 8), busca-se explicitar a estrutura do saber referente à representação digital da geometria da obra (técnicas e tecnologias de modelagem paramétrica) tendo por base a estrutura conceitual anteriormente identificada para o Projeto Eden. 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 8 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 8 Esquema síntese do algoritmo e suas etapas para a geração da forma do projeto Éden.



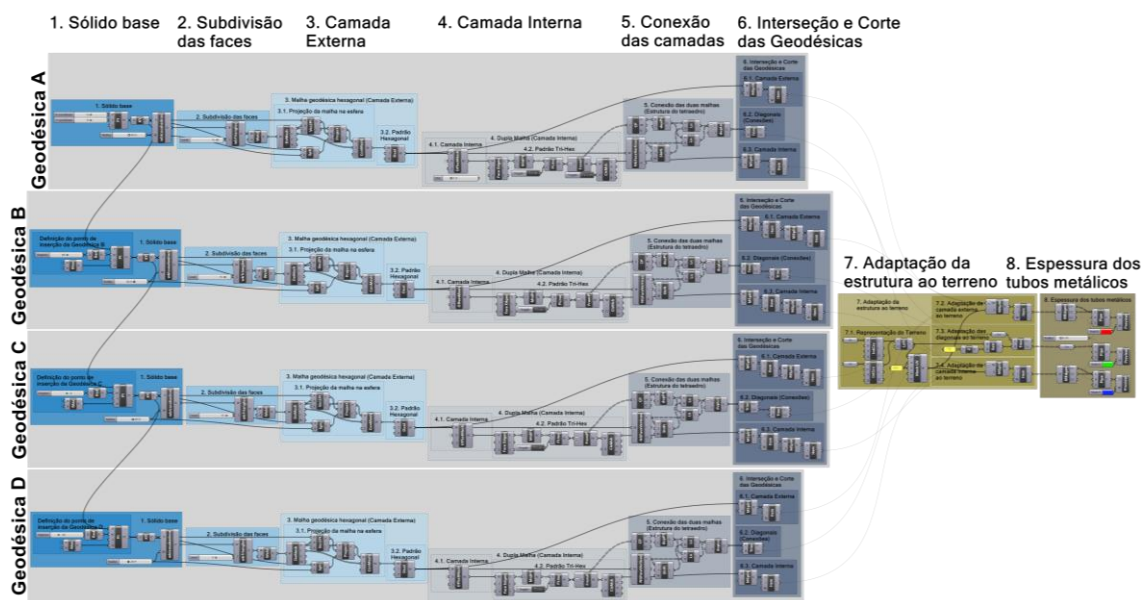
Fonte: Elaboração própria.

Conforme o esquema, a representação do Projeto Eden foi planejada para iniciar com a definição do sólido base de cada geodésica, o icosaedro (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).

4 ELEMENTOS DE SABER TECNOLÓGICOS DO PROJETO ÉDEN

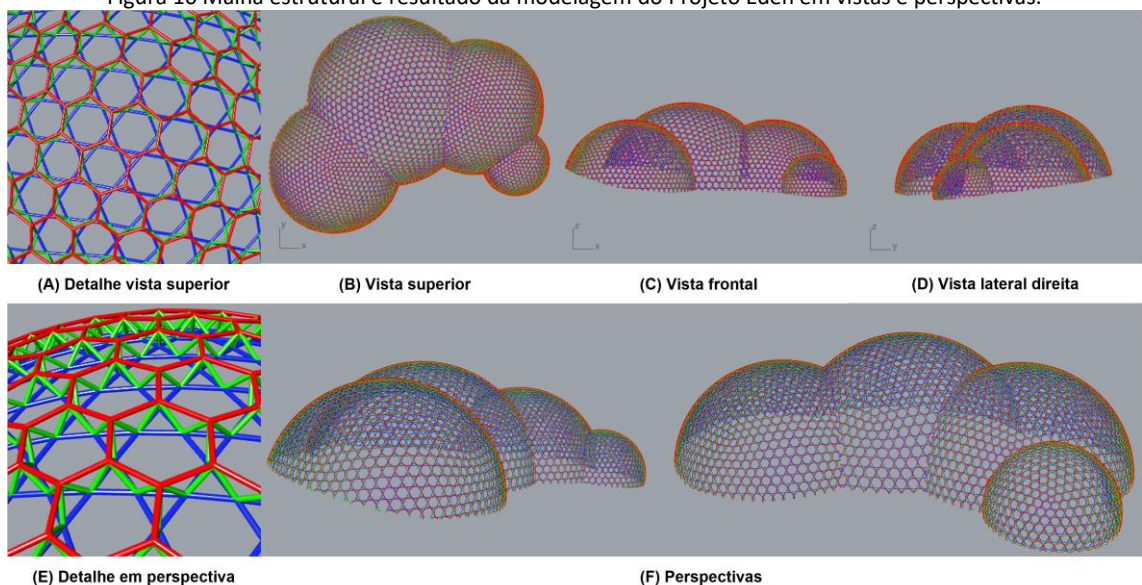
A estrutura de saber anteriormente apresentada pode ser complementada com o discurso tecnológico, que reúne as técnicas de representação, executadas em modelagem paramétrica. Tendo-se por base tal saber, foi possível definir uma programação visual para gerar o modelo geométrico, como pode ser visto na Figura 9. Cada um dos elementos do saber, previamente identificados, foi transposto para as etapas de modelagem paramétrica, tornando explícitos os elementos tecnológicos dessa estrutura. Na Figura 10, tem-se como resultado da modelagem os modelos geométricos das geodésicas do projeto com a sua estrutura em malha e a adaptação ao perfil do terreno.

Figura 9 Programação visual do Projeto Eden.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 10 Malha estrutural e resultado da modelagem do Projeto Eden em vistas e perspectivas.



Fonte: Elaboração própria.

O Projeto Éden foi, e ainda é, um marco para o Reino Unido, uma vez que sua complexidade geométrica e materiais inovadores fizeram com que o projeto ganhasse destaque internacional. Para atingir tal patamar, sua estrutura de saber avança em relação ao projeto referência, a Biosfera de Montreal. Isto ocorre, em um primeiro momento, por manter a estrutura em geodésica, bem como a preocupação com a sustentabilidade, seu caráter expositivo e a busca por contribuir com a preservação do meio ambiente.

Essa abordagem equivalente no conceito dos dois projetos é traduzida em sua geometria, uma vez que ambos se apropriam de uma estrutura com dupla camada de malha, como uma maneira de alcançar os ideais pretendidos. E é justamente nesse ponto que esse artigo busca reforçar a importância do ensino dessa disciplina para o curso de arquitetura. O estudo comparativo desses projetos exemplifica como a geometria complexa da arquitetura pode ser aplicada no processo projetual, além de ressaltar a importância da própria geometria na concepção arquitetônica. Isso demonstra a importância de compreender os diferentes processos de projeto e, mais do que isso, compreender a maneira como a mesma estrutura de saber, nos termos de Chevallard (1999), é abordada em diferentes situações de projeto.

6 CONCLUSÕES

O estudo de um projeto referencial, conforme proposto neste trabalho, exemplifica como a geometria complexa pode ser aplicada no processo projetual, indo além da intenção de configurar uma forma ao avançar para questões de funcionalidade. Com isso, é possível avançar para uma estruturação integral do saber, com o propósito de ser inserido no ensino de arquitetura, associando conceitos de geometria, parametria e sustentabilidade, que são fundamentais para a prática profissional contemporânea.

Além de impulsionar a formação profissional, contribui-se para a construção de um repertório de arquitetura mais amplo e integrado, pois tais elementos de saber foram sistematizados 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 tendo por base a estrutura de saber teórica, técnica e tecnológica que os envolve.

REFERÊNCIAS

ASANOWICZ, Aleksander. Parametric design - Tool, medium or new paradigm?. In: Fioravanti, A, Corsi, 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.

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

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

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.

EDEN Project. Eden Project, 2022. 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.

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.

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

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.

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

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

PITTMAN, Robert. **Eden Project Panorama**. 4 de abril de 2015. Fotografia. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/50144889@N08/16415110163/>>. Acesso em: 25 abril 2023.

SAEEDI, Panteha. **Projeto Éden estufa**. Dez, 2013. Fotografia. Disponível em: <<https://pixabay.com/pt/photos/projeto-eden-estufa-plantas-223121>>. Acesso em: 25 abril 2023.