REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2023, Vol. 13, No. 26
DOI 10.23972/det2023iss26pp119-141

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

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

Fernando F. Zauk[1]; Janice F. Pires[1]

1 *Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Pelotas, Brasil*

RESUMO

O processo de projeto em meio digital evolui 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 em modelos analógicos. Os arquitetos desenvolveram modelos físicos aptos a modificações, a partir do 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 também 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 com 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. Busca-se, então, a partir de uma teoria didática, explicitar o saber envolvido relacionado com aplicações de malhas na arquitetura e compreender os conceitos geométricos que integram suas propriedades funcionais, para motivar a apropriação destes na prática de arquitetura por meio do projeto paramétrico. Tendo-se por base um estudo teórico de projetos referenciais, tenta-se compreender o processo de projeto desenvolvido para a definição formal e os conceitos e técnicas associadas, tendo-se por base a noção estruturada de um saber, de Yves Chevallard. A partir dessa teoria, define-se um método de estruturação do saber envolvido em cada um dos casos estudados, apresentando-se um dos projetos estudados. Como resultado da sistematização, tem-se uma abordagem integrada entre desempenho das superfícies, a estruturação formal e construtiva, de análise e requisitos essenciais ao processo de projeto contemporâneo, propiciada pela modelagem paramétrica e o saber da geometria.

PALAVRAS-CHAVE

Geometria Complexa;
Projeto Paramétrico;
Malhas;
Ensino de Arquitetura

Meshes in parametric projects with complex surfaces: A formative repertoire for architecture

ABSTRACT

The design process in digital media evolves from the technologies of representation, technical documentation, simulation, performance evaluations, to the approach of parametric design, which has influenced and subsidized the current production of architecture. Antoni Gaudí and Frei Otto are considered the pioneers of this approach in their design processes, albeit in analog models. The architects developed physical models capable of modification, using suspended meshes controlled by variable weights. For the current moment of digital processes in architecture, meshes have expanded their uses along with parametry, such as solutions for representation, tessellation, analysis and optimization of processes, structural solutions and also the possibility of simulating the action of physical forces to generate curved and curved geometries. optimized. 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 basis is needed that allows for the advancement to higher levels of complexity required for mastering parametric design. In this process, it is important to deal with applications of geometry in architecture beyond aesthetic issues, understanding how a non-trivial shape can present functional attributes that show the quality of a project for the current context. Therefore, based on a didactic theory, we seek to explain the knowledge involved in the application of meshes in architecture and to understand the geometric concepts that integrate their functional properties, in order to motivate their appropriation in architectural practice through parametric design. Through a theoretical study of referential projects, we try to understand the project process developed for the formal definition and the associated concepts and techniques, based on the structured notion of knowledge, by Yves Chevallard. Based on this theory, a method of structuring the knowledge involved in each of the cases studied is defined, presenting one of the projects studied. As a result of the systematization, there is an integrated approach between surface performance, formal and constructive structuring, analysis and essential requirements for the contemporary design process, provided by parametric modeling and the knowledge of geometry.

KEYWORDS

Complex Geometry;
Parametric Design;
Meshes;
Architecture Teaching

CONTATO: Janice F. Pires – *janicefpires@hotmail.com*

© 2023 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

O atual momento da prática profissional em arquitetura caracteriza-se por processos de projeto desenvolvidos em meio digital, envolvendo uma arquitetura que é gerada e concebida computacionalmente. Mais do que nunca, o projetista tem a oportunidade de tratar com questões para além da representação e que podem ser resolvidas digitalmente, principalmente, a partir da abordagem do projeto paramétrico. Nesse sentido, Kolarevic (2005) caracteriza os meios digitais como um método colaborativo, tratando simultaneamente as etapas de design, análises, 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 tal 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 tem cada uma de suas partes delimitadas, estabelecendo uma definição da geometria de cada elemento do design - mesmo que implicitamente - de modo a valorizar a sequência de desenvolvimento do projeto, suas relações e lógicas internas. Para o autor, o interesse na representação final do modelo cede espaço para a associação entre a geometria concebida e as soluções relacionadas aos requisitos projetuais.

Esta abordagem também tem facilitado a concepção e representação de formas complexas configuradas por geometrias que possuem elevado nível de desempenho, como as superfícies de dupla curvatura, que no passado foram empregadas por Antoni Gaudí e Frei Otto em modelos físicos experimentais. Gaudí, a partir de uma estrutura em malha, formada por uma teia de cordas suspensas, sob a ação da gravidade e sujeitas a simulação de forças ao pendurar sacos de areia de pesos variáveis, encontrava novas configurações geométricas que mantinham as propriedades estruturais das formas geradas. O arquiteto tinha conhecimento de que por meio da Lei de Hookie[1] 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.

Posteriormente, o arquiteto Frei Otto também adota estruturas em malhas para configurar seus projetos, mas amparado em conceitos advindos de estudos experimentais em bolhas de sabão, explorados no século XIX por Plateau entre 1843-1869 para encontrar superfícies mínimas (CARMO, 1987). Dessa maneira, o arquiteto conseguia configurar superfícies que possuíam equilíbrio estável e assim suportavam as forças aplicadas e que, ao mesmo tempo, atingiam princípios de otimização, avançando seus estudos relacionados à *performance* de superfícies.

Considerados os pioneiros em processos paramétricos analíticos de arquitetura, Gaudí e Otto definiam um espaço de projeto em meio físico, caracterizado com técnicas de cálculo e simulação para a busca de formas complexas otimizadas (HUERTA, 2006). Segundo Kolarevic (2005), as geometrias atuais podem ser entendidas como releituras de tais propostas do passado e que agora estão mais acessíveis para serem aplicadas no projeto de arquitetura. O autor destaca que, embora a matemática já era capaz de defini-las formalmente, existia uma limitação para que os arquitetos as aplicassem em seus projetos, devido a lacuna das tecnologias de representação e construção existentes na época.

Com isto, 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 aumentaram a possibilidade 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 a integração que os recursos digitais possibilitam entre projeto e produção.

Essa arquitetura digital não é abordada com o mesmo pensamento tradicional de projeto, pois busca apresentar novas maneiras de construir e projetar formas complexas, a fim de viabilizar tais propostas arquitetônicas (KOLAREVIC, 2005). Para o autor, as mudanças não se limitam a questões formais, se expandem para o processo de projeto como um todo, pois as informações contidas no modelo digital são também inerentes à construção. Neste cenário, as representações em arquitetura tornam-se processos mais dinâmicos, registrando o histórico do próprio desenvolvimento do projeto, adicionando a transformação e a visualização em tempo real das alterações da forma (ALMEIDA; NOGUEIRA, 2018). Para tal, o projeto deve ter suas partes associadas desde o lançamento inicial, pois assim as alterações pontuais no modelo são capazes de produzir ações em conjunto em todo o sistema simultaneamente.

Não somente para demandas de concepção projetual, mas a arquitetura digital também busca dar apoio a resolução de questões relacionadas à construção civil e um desenvolvimento sustentável - conceito estabelecido por Brundtland (1987) no relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Nesse sentido, Hubers (2011) define uma arquitetura sustentável como aquela capaz de atender os requisitos atuais sem comprometer a capacidade das próximas gerações de satisfazerem suas próprias necessidades. Uma das maneiras da arquitetura contribuir para o desenvolvimento sustentável está diretamente relacionada com os processos desencadeados a partir do desenho paramétrico, que juntamente com tecnologias de análise e simulação, possibilitam atingir resultados direcionados à otimização (CHI *ET AL.*, 2009) do objeto de estudo. Isto é possível a partir do reconhecimento das propriedades de cada material a ser empregado e da seleção destes, reduzindo resíduos e desperdícios, a fim de promover uma maior eficiência energética na construção e ambientes com maior conforto ao usuário.

Questões geométricas associadas ao desempenho da forma arquitetônica também são abordadas no contexto da arquitetura digital, em alguns projetos contemporâneos direcionados a otimização e uma busca de um uso mais sustentável dos materiais de construção (BERTOL, 2011; PIRES; PEREIRA, 2018; OLIVEIRA; PIRES, 2021).

No entanto, tal abordagem ainda não faz parte da maioria dos currículos das escolas de arquitetura do Brasil, apontando a necessidade de os arquitetos buscarem esta formação quando ingressam no contexto profissional (CELANI; BARBOSA NETO; FRANCO, 2018). Por exigir um novo modo de pensar, este tipo de projeto ainda é visto pelos estudantes, e até mesmo pelos arquitetos, como avançado ou complexo demais. Visando promover a aprendizagem do projeto paramétrico na

[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.

arquitetura, Pires, Pereira e Gonçalves (2017) sugerem a necessidade de um reconhecimento do vocabulário geométrico desde as geometrias mais elementares até níveis crescentes de complexidade, visto que tal processo vem a facilitar a compreensão sobre as próprias técnicas de geração, os seus parâmetros de controle e a lógica relacional entre os elementos constituintes de tais geometrias. Nesse contexto, Leopold (2003) destaca que o ensino de geometria não deve ser uma disciplina isolada e terá significado somente quando associado às demais áreas do curso de arquitetura. Isso facilita o entendimento de questões formais, estruturais, estéticas, até mesmo de conforto e eficiência, pois a geometria pode traduzir para o projeto algumas dessas implicações. Além disso, promove o desenvolvimento da noção espacial a partir da correlação dos conceitos geométricos com situações concretas de arquitetura (LEOPOLD, 2003).

Importante destacar que o ensino da representação gráfica digital não deve se restringir a habilitar os estudantes unicamente em serem exímios usuários das tecnologias digitais e sim abordar uma estrutura mais integral do saber, nos termos da Teoria Antropológica da Didática de Chevallard (1999), que subsidie o reconhecimento de todos os elementos implicados para que os estudantes se tornem autônomos neste processo. Isto significa compreender e ter a possibilidade de explicitar diante de uma tarefa ou problema, as técnicas de sua resolução, as tecnologias que explicam, justificam e suportam as técnicas (que fazem estas funcionarem para uma dada tarefa) e as teorias que têm o mesmo papel em relação às tecnologias. Esta abrangência da estrutura do saber tem tido resultados significativos em processos de ensino da representação gráfica digital aplicada à arquitetura, especialmente no ensino da geometria em estágios iniciais de formação (PIRES; SILVA, 2012; SILVA ET AL, 2012; PIRES; FÉLIX; BORDA, 2016).

1.1 A Relevância do Tema para a Formação e Prática de Arquitetura

Assim como Gaudí e Otto incorporavam conhecimentos geométricos em suas obras, por meio do emprego das malhas sujeitas a princípios de otimização, atualmente esta abordagem é amplamente empregada na arquitetura, essencialmente por meio do desenho paramétrico em meio digital. Autores como Pottmann *et al.* (2007) não só definem as malhas como uma geometria originada a partir de polígonos planos – independentemente do número de lados - como também afirmam que a influência da modelagem computacional tende a simplificar as formas em triângulos pela simplicidade geométrica.

Embora a aplicação de malhas na representação digital se justifique pela simplificação do cálculo matemático quando se trata da geração de geometrias curvas, esta técnica também é voltada a geração de modelos de geometrias otimizadas resultantes de simulações de forças físicas. São capazes de subdividir uma superfície complexa para resolver e suavizar superfícies não convencionais (PAN *ET AL.*, 2016) e são empregadas em análises e em processos de otimização de questões estruturais (FLEISCHMANN; AHLQUIST, 2009). Ainda resolvem questões pertinentes ao contexto da construção civil, já que qualquer forma curva pode ser construída a partir de painéis planos (FLEISCHMANN; AHLQUIST, 2009,) e traz a possibilidade de se ter uma padronização (SHIMADA; GOSSARD, 1998), reduzindo a demanda por múltiplos moldes.

Com isso, considera-se a importância de identificar e compreender quais os conceitos da geometria e da representação gráfica digital estão associados à estruturação de uma forma arquitetônica complexa, construída com o auxílio das malhas e associadas a sua gama de potencialidades na configuração da forma. Visando a atualização em novos 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 à construção do conhecimento geométrico e tecnológico associado ao processo de projeto paramétrico no âmbito do ensino.

A realidade dos escritórios de arquitetura, em especial no Brasil, apresenta certa resistência para as mudanças tecnológicas da área, seja pelo investimento no domínio dos recursos digitais ou pela presença de métodos já consolidados na em suas rotinas. Ao passo que profissionais resistem a abordar os novos métodos de projeto, a barreira criada para essas novas tecnologias acaba por enrijecer suas práticas aos métodos tradicionais e não dar espaço para os processos paramétricos (CELANI; BARBOSA NETO; FRANCO, 2018).

Uma das maneiras de enfrentar esta realidade no campo da arquitetura é abordar estas novas tecnologias desde a graduação, aproximando o estudante às questões profissionais e, dessa forma, promovendo uma capacitação e habilitação aos requisitos necessários para a prática da construção civil. Nesse contexto, o projeto paramétrico surge com uma nova demanda de desenvolvimento de projeto e, principalmente, do processo projetual, que não é contemplada no ensino satisfatoriamente, segundo os autores referidos anteriormente. Mesmo quando presente no currículo dos cursos de arquitetura, a formação em tal processo de projeto é insuficiente para a vida profissional, sendo necessário que os novos arquitetos busquem um aprendizado mais profundo e direcionado ao seu campo de atuação (CELANI; BARBOSA NETO; FRANCO, 2018).

É ainda pequeno o universo de pesquisas que abordam a presença da geometria por trás do conhecimento necessário quando se pensa em um projeto paramétrico, principalmente quando associado ao ensino. Por esta razão, a pesquisa nasce do desejo de entender de que maneira os conceitos geométricos associados à estruturação de uma forma arquitetônica complexa podem contribuir para a sua compreensão e apropriação e, a partir disso, proporcionar o acesso a tais soluções de maneira didática, a fim de facilitar que este conhecimento possa ser aplicado pelos estudantes de arquitetura no decorrer de sua formação.

Isso, pois, alguns projetos arquitetônicos são capazes de, por intermédio da sua forma final, explicitar a geometria que dá origem ao seu processo, no entanto, quando a geometria se torna complexa diante do resultado final, acaba por dificultar a análise do projeto. Isto porque muitas vezes esta geometria passa por sucessivas transformações, que precisam ser explicitadas para que todo o processo possa ser compreendido. Por isso entende-se que a compreensão das geometrias integradas ao projeto arquitetônico possa ser um meio de aproximação dos estudantes e arquitetos aos processos contemporâneos de design, em que o projeto paramétrico adquire, cada vez mais, um papel fundamental.

1.2 Delimitação do Problema de Pesquisa

As superfícies poliédricas possuem diversos campos de atuação, seja na triangulação e simplificação de superfícies mais complexas, estudos de força e otimização estrutural a partir de cálculos paramétricos ou até mesmo a análise e performance de superfícies totalmente contínuas. Também são importantes em questões de construção, ao mesmo tempo pela economia de material em configurações formais que otimizam a estrutura e pela racionalização do processo construtivo, reduzindo resíduos e desperdícios, pela padronização e repetição dos elementos.

Empregar superfícies complexas geradas por malhas poligonais requer um conhecimento da geometria adotada,

pois exige compreender suas propriedades, de tal maneira que seja uma escolha do arquiteto e que traga benefícios à arquitetura. Com isso a pesquisa perpassa por questões didáticas, devido à necessidade de explicitar tal conhecimento de modo a integrá-lo na formação em arquitetura, como uma maneira de construir um repertório geométrico para a prática do projeto paramétrico com geometrias complexas recorrentes na arquitetura contemporânea dos últimos anos.

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

1.3 Objetivos

Explicitar o saber associado às superfícies complexas da arquitetura contemporânea definidas por malhas e por meio do desenho paramétrico, visando compreender como pode ser integrado aos processos formativos de geometria e representação.

1.3.1 Objetivos específicos

1) Identificar aplicações da geometria de malhas poligonais na arquitetura e os correspondentes processos digitais de projeto 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 poligonais;

3) Caracterizar tais geometrias a partir da explicitação dos conceitos geométricos envolvidos e da modelagem destas por meio de malhas poligonais parametrizadas;

4) Apoiar a inserção do estudo de geometria complexa e da modelagem paramétrica no âmbito da formação em arquitetura.

5) O artigo aqui apresentado é um recorte de uma pesquisa de mestrado e irá apresentar os resultados do método empregado a um exemplo referencial de arquitetura, a Biosfera de Montreal, de Richard Buckminster Fuller.

2. O CONTEXTO DA ARQUITETURA DIGITAL

Quando surgiram, por volta dos anos 60, e em especial a partir dos anos 80, quando passaram a ser utilizadas em larga escala, as tecnologias CAD eram abordadas na arquitetura como ferramentas de representação (ELOY; CRUZ, 2012). Ou seja, projetistas não utilizavam as tecnologias de representação gráfica digital para o desenvolvimento do processo de projeto, uma vez que este ainda era realizado de modo tradicional com o objetivo apenas de representação, para visualizar as ideias a partir de modelos, apenas substituindo o desenho à mão.

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 uma sua sequência evolutiva: o suporte do computador e do meio virtual (LACOMBE, 2006).

Para Brown e Mueller (2019), os computadores geram formas e fornecem soluções de problemas de maneira mais rápida e abrangente do que o pensamento humano, porém isso deve ser realizado de modo a subsidiar e potencializar o processo criativo, sem restringir as opções e, para isso, o projeto baseado em computação ainda requer a interação humana. O homem ainda é o agente principal nesse processo, apenas se utiliza do computador como recurso de projeto. Para o Lacombe (2006), não é apenas um uso relacionado a novidade e atualização tecnológica, mas apresenta vantagem ou benefício frente ao processo que era executado antes.

Para Plácido e Eloy (2000), a partir desse avanço tecnológico que existe junto à arquitetura, situações em que o profissional da área se utiliza da modelagem digital apenas como método de representação das suas ideias, refere-se a um cenário de subutilização. Entende-se que, para os processos de arquitetura, os meios digitais são catalizadores e devem ter seus usos justificados no benefício para o projeto e processo de projetar. A arquitetura não é inteiramente um processo digital, mas o digital é um dos métodos que existem de se fazer arquitetura (ELOY; CRUZ, 2012). Desenvolver o projeto digitalmente não está tirando o espaço de criação dos projetistas, mas complementando, enriquecendo e facilitando o trabalho que antes era desenvolvido de maneira manual.

A aproximação das tecnologias digitais de representação com a lógica natural do desenhar e pensar humano promove uma harmonia na interação do homem com a máquina, pois facilita a troca entre eles de forma a intensificar sua sincronia no processo de projeto (ELOY; CRUZ, 2012). Se inicialmente o arquiteto teve que buscar novos saberes para lidar com este tipo de representação, agora a tecnologia tem se adaptado à realidade dos arquitetos. Isso não quer dizer que os métodos tradicionais de projetar são facilmente transferidos para o meio digital, apenas que a sua transposição passa a ocorrer de maneira mais fluida, já que a comunicação está cada vez mais facilitada. Com isso, pode-se dizer que o maior aceite e compreensão da tecnologia junto aos processos de projeto ocorrem em decorrência do avanço na comunicação do homem com a máquina (ELOY; CRUZ, 2012).

O meio digital adquire o caráter de ser um recurso auxiliar ao projeto e à construção arquitetônica, pois passa a fazer parte do processo projetual (ELOY; CRUZ, 2012) além da função de representá-lo. As tecnologias digitais começam a contribuir nas tomadas de decisão, são capazes de avaliar e de diagnosticar os elementos de projeto durante o processo, seja na fase inicial como também durante a etapa de construção e de operação. Apesar disso, Lacombe (2006) afirma que o uso de tecnologias digitais de representação não é uma garantia de êxito no resultado final, mas é a evolução do processo de projeto. Os processos digitais não asseguram um resultado positivo no processo de projeto, pois este ainda depende das ações do homem, que é o responsável pelas definições e avaliações a serem utilizadas nas etapas de análise do projeto.

Para além da representação conceitual e técnica, referidos anteriormente, o processo de projeto em meio digital também propicia lidar com questões relacionadas à construção e gerenciamento de obra, que abarcam requisitos de desempenho nas mais diversas etapas do ciclo de vida do projeto. Com isso, ao mesmo tempo em que possibilita uma arquitetura mais sustentável, houve uma exigência de os arquitetos lidarem com novos saberes para além do campo da arquitetura e que não podem ser expressos a partir das maneiras tradicionais de representação de projeto (PETERS, 2011). Nesse sentido, o autor acredita que uma arquitetura sustentável deve combinar aspectos do meio ambiente, da cultura local, dos sistemas construtivos e também as estratégias dos usuários. Se em um primeiro momento a ideia de sustentabilidade refere-se a um processo de minimizar o uso de material, aqui as tecnologias digitais não se limitam a tal proposta, mas avançam ao oferecerem novas maneiras de desenvolver e pensar esse projeto, desde a forma, passando

pelo gerenciamento de serviços e de material, até a relação de uso dos usuários. Ao observar e estudar projetos com diretrizes de sustentabilidade na arquitetura contemporânea identifica-se a presença destes aspectos com estrita associação aos tipos de formas e geometrias empregadas.

2.1 Arquitetura Digital no Contexto Brasileiro

Celani (2018), ao fazer uma reflexão sobre a evolução da arquitetura no Brasil nos séculos XX e XXI, destaca o momento de glória arquitetônica brasileira junto ao surgimento da cidade de Brasília, a exposição de prédios nacionais como obras de arte e o reconhecimento dos arquitetos brasileiros com premiações Pritzker. Segundo a autora, todo o destaque arquitetônico nacional acabou por estagnar avanços e criar uma acomodação que impediu o país de acompanhar o desenvolvimento na área, tanto no cenário da prática profissional como no ensino de arquitetura.

Para a autora, existe um atraso no desenvolvimento da arquitetura em relação aos países mais desenvolvidos, desde que o Brasil deixou de ser um referencial e agora busca se equiparar ao desenvolvimento já assimilado no exterior. As tecnologias digitais em tal contexto são aplicadas desde o lançamento do projeto, seja na exploração da forma, sua implantação ou orientação no terreno, por meio de análises e avaliações de ganho térmico, insolação, sombreamento, de estruturas e de incidência de ventos (CAMPOS, 2018). Escritórios de arquitetura fora do contexto brasileiro utilizam desse ambiente digital não só para o lançamento do projeto e sua modelagem, mas também como meio de desenvolvimento do mesmo.

A falta de diálogo entre os profissionais brasileiros e as pesquisas nacionais é um fator agravante para essa situação, pois resulta em importação de tecnologias mesmo quando há alternativas locais viáveis (CELANI, 2018). Enquanto não há uma preocupação com a transposição do saber abordado junto ao meio acadêmico para o contexto profissional, estes se distanciam, cada um buscando uma alternativa que atenda às suas necessidades, sem que se promova uma colaboração para o crescimento da arquitetura brasileira por inteiro.

Os avanços nacionais mais significativos são em relação às questões de ensino, uma vez que conferências de gráfica digital - em especial o SIGraDi - contam com uma rede de troca de conhecimento da qual a pesquisa brasileira participa ativamente (SPERLING; HERRERA; SCHEEREN, 2020). Neste ponto, é evidente o distanciamento da prática profissional com o ensino, pois enquanto as universidades já estão se inserindo e buscando estabelecer um patamar de apropriação das tecnologias digitais, a prática profissional ainda se encontra muito atrelada à cadeia construtiva vigente, que ainda não se apropriou das novas tecnologias em seus processos e desenvolvimento de produtos e ainda perpetua as práticas baseadas em técnicas de construção tradicionais. Segundo Sperling, Herrera e Scheeren (2020), isto resulta em uma separação muito evidente do incentivo – principalmente econômico – ao desenvolvimento digital na indústria e no meio acadêmico na América Latina, mas que representa com clareza a situação brasileira.

2.2 Arquitetura e o Projeto Paramétrico

Segundo Woodburry (2010) os principais meios de trabalhar com projeto sempre estiveram relacionados com lápis, borracha e papel, pois tais tecnologias são responsáveis por dar suporte a manipulação de elementos gráficos (adicionar, subtrair, sobrepor, representar, etc.). Para o autor, a transição para o digital apenas emulou as ações já conhecidas dos arquitetos, replicando-as como aconteciam antigamente. Foi a partir do advento do desenho paramétrico que passou a existir uma mudança significativa no 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). Quando a arquitetura passa a abordar digitalmente um projeto com diversas soluções, Asanowicz (2017) caracteriza como inviável tentar resolver individualmente cada um desses pontos, pois aumentaria a demanda de tempo e investimento. Então, o autor aponta para 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 o 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). Asanocwicz (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 meio de parâmetros e, consequentemente, em variações destes, criando em cada uma das situações uma solução única e original para a forma final, independente da geometria obtida nesse processo.

Dessa maneira, amplia o horizonte de possibilidades para o arquiteto em relação a modelagem de soluções de projeto, pois permite a criação de uma infinidade de instâncias similares de objetos e manifestações geométricas sob os mesmos requisitos projetuais (KOLAREVIC, 2005). Embora valorize a transformação de todo o modelo a partir da modificação dos parâmetros, o projeto paramétrico não se restringe a um modelo controlado ou modificado por parâmetros, mas destaca essas variáveis ao passo que descreve a relação entre os componentes do modelo (KATZ, 2010). Para o Guto Requena, a importância da parametria encontra significado nas possibilidades de controle, transformação e variação do projeto, promovendo assim um resultado mais significativo ao problema (SEDREZ, 2018a).

O desenho paramétrico é, primeiramente e acima de tudo, um processo de projeto baseado no pensamento algorítmico, o que desencadeia uma mudança de foco no desenvolvimento, passando da fidelidade na representação e aparência do design para a sua lógica interna (JABI *ET AL.*, 2017). Segundo Almeida e Nogueira (2018), o arquiteto deixa de projetar formas para começar a desenhar sistemas ou processos, por que a manipulação da representação digital num software de desenho paramétrico não ocorre a partir da manipulação de um ente geométrico, mas na programação das etapas de representação, de tal forma que o responsável acaba gerando um algoritmo – conjunto de regras que descrevem um processo (KATZ, 2010) – responsável pela visualização do modelo. A relação dos seus elementos e a lógica interna de construção do modelo são mais valiosas para a parametria do que a própria representação final do modelo, já que seu interesse é voltado aos conceitos matemáticos e geométricos integrados às formas e soluções adotadas. Passa a destacar as relações entre as partes, conexões que abordam o projeto de forma integrada, em que as modificações – por menores que sejam – causam alterações em todo o modelo.

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). Mesmo sendo uma tarefa demorada, o autor afirma a importância de estruturar corretamente o modelo paramétrico, pois armazenará o histórico de informações do projeto. Ao utilizar o parâmetro, promove-se suporte para a construção do objeto e com as conexões se transmite o histórico de todo o processo, sendo as ações e relações aplicadas à cada elemento integrante do design que irão narrar as transformações até se obter o resultado final.

Segundo Woodburry (2010) o ato de relacionar elementos requer um pensamento explícito sobre cada conexão realizada no modelo. Elas precisam ser evidentes, construídas e desconstruídas com facilidade, para que novas relações possam ser realizadas. Isso explicita a matemática integrada do projeto, de tal forma que o autor compreende o designer 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.

2.3 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 Mehrtens, 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 alternativas de representação até o processamento de informação, com isto, os escritórios de arquitetura passaram a investir em abordagens de projeto e geometria com complexidade cada vez maior (STALS; JANCART; ELSEN, 2018). Os mesmos autores ressaltam que há maior apropriação quando se investe em equipes especializadas para manipular as novas técnicas e adaptar o próprio processo de projeto, até mesmo desenvolvendo softwares específicos, fato que é recorrente nos 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. Segundo os 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.

Em sua pesquisa realizada na Bélgica, Stals, Jancart e Elsen (2018) apontam que mais de 70% dos arquitetos do país se utilizam de ferramentas digitais no desenvolvimento de projeto, mas apenas 12,5% fazem uso do projeto paramétrico regularmente. Isso porque os arquitetos entrevistados acreditam ser uma tecnologia e abordagem voltadas a grandes projetos complexos, apropriadas apenas por arquitetos famosos e direcionadas a projetos diferenciados que se destacam e/ou para projetos que possuem grande subsídio econômico.

2.4 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, consequentemente, criam novas possibilidades, desafios e campos de atuação para arquitetos e urbanistas. Segundo Seifert e Petzold (2018) os alunos de graduação do curso de arquitetura e urbanismo possuem dificuldades para selecionar as tecnologias digitais necessárias para a solução de seus problemas e, mesmo 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 e 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, porque ao questioná-las, acabamos por promover e incentivar os avanços na área (SEDREZ, 2018a). Para o autor, arquitetos, pesquisadores e estudantes devem se apropriar de tais tecnologias para tirar proveito de seus potenciais e enfrentar suas fraquezas, pois estamos vivendo apenas o início de uma era de exercício digital, de computação e fabricação em projetos arquitetônicos.

Para o ensino em arquitetura que começa a encarar as tecnologias digitais é importante entender que isso não significa abordar a graduação como um curso focado em softwares e acabar por treinar o estudante para que este possa atuar como especialista digital ou programador. Em Celani, Barbosa Neto e Franco (2018), Peter Mehrtens reforça a ideia de habilitar os estudantes sem torná-los especialistas quando sustenta a necessidade do estudo contínuo em arquitetura, como qualquer outra atividade, os profissionais devem estar constantemente buscando seu aprimoramento e qualificação para prática profissional. Assim, deve existir um balanço entre capacitar os estudantes para a vida profissional de modo que estes possam adotar novas tecnologias em seus escritórios sem que os cursos de arquitetura se tornem especialistas em informática gráfica.

Deve-se tratar o ensino de parametria com a profundidade e seriedade necessária para se desvincular a ideia de ensinar os estudantes a lidar com softwares, pois o desenho paramétrico 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, de maneira a considerá-lo com a importância adequada, valorizando-o como método a partir de um novo pensamento de projeto, desenvolvendo uma arquitetura mais atual e condizente com o contexto digital.

Atualmente, o ensino de projeto paramétrico em cursos de arquitetura está voltado para softwares como Rhinoceros/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). Ou seja, tais softwares trabalham a escrita complexa de algoritmos por meio de elementos mais intuitivos por não exigir a manipulação direta em um ambiente de scripts, promovendo uma aproximação ao seu público, uma vez que a linguagem visual facilita esse contato. Além disso, outro fator que reforça o valor de trabalhar em um ambiente integrado, como ocorre com Rhinoceros e Grasshopper, é que além de permitir a escrita e criação de algoritmos, admite exportar os modelos para softwares de análise mais complexos (SEDREZ, 2018b).

2.5 O papel da Pesquisa em Desenho Paramétrico

Para Stals, Jancart e Elsen (2021), as pesquisas atuais na área de parametria são direcionadas para o desenvolvimento de novos aplicativos, em vez de focar na compreensão dessa nova metodologia e no ajuste de estratégias para adotar um fluxo de trabalho paramétrico na prática profissional. Dessa maneira, resulta no direcionamento aos estudos voltados ao desenho paramétrico para escritórios que apresentam numerosas equipes de desenvolvimento especializadas em novas tecnologias, ignorando a realidade desta abordagem em pequenos e médios escritórios de arquitetura. Os autores acreditam ser necessária a coexistência entre pesquisas que desenvolvem novas tecnologias de representação paramétrica para o contexto da arquitetura e àquelas que enfoquem o desenvolvimento do processo de projeto paramétrico adaptado para a realidade dos escritórios.

Entende-se que a necessidade de estudos voltados à inserção de desenho paramétrico no contexto dos pequenos escritórios não é apenas por meio da transposição do processo tradicional (mas digital) para o projeto paramétrico. É fundamental ir além disso, sendo necessário demonstrar o potencial avanço possibilitado pelo desenho paramétrico. Pois assim as pesquisas poderão auxiliar os profissionais no processo de transição para a parametria como uma abordagem mais alinhada à realidade dos pequenos escritórios, mas que, ao mesmo tempo, possa despertar o interesse destes em avanços ao método de projeto já adotado.

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, identifica nas pesquisas como uma abordagem direcionada para o campo conceitual, porém o autor percebe exatamente o contrário na realidade. A prática profissional de arquitetura tem se apropriado justamente no desenvolvimento do projeto em geral, beneficiando o próprio andamento de suas etapas.

Com isso entende-se justamente que a pesquisa é um meio de aproximar a prática e o ensino de desenho paramétrico. Deve-se pensar em como comunicar esses avanços dos grandes escritórios para os 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.

2.6 Ensino de Projeto (Paramétrico)

Segundo Florio (2011), o ensino de arquitetura deve ter suas disciplinas conectadas para atuarem de maneira integrada na formação dos estudantes. 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. Entender arquitetura além da aplicação da técnica, seja ela a tradicional ou somente a alternativa mais atual, mas apropriar-se de ambas para a provocação de uma arquitetura mais completa. Nesse sentido, Florio (2011) reforça a importância de integrar os novos saberes da arquitetura digital com os conteúdos já estabelecidos no currículo, uma vez que a necessidade de atualização dos processos de projeto é essencial para a formação em arquitetura, como oportunidade para reflexão e crítica de maneira construtiva à prática profissional.

A tecnologia tem contribuído para avanços significativos em estudos de formas complexas (FLORIO, 2011). Sendo assim, faz-se necessário investir nesse meio digital, principalmente na abordagem paramétrica, pensando a arquitetura a partir da lógica computacional. Projetar em meio digital não requer apenas a busca de uma solução, mas a estruturar o resultado a partir de uma sequência lógica, exigindo um domínio cada vez maior sobre o objeto.

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 forma a controlar não só o objeto, mas também seus efeitos e reações frente a cada mudança de parâmetro. Para Woodbury (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. 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 era baseada na modelagem de formas complexas, destacando a associação de questões conceituais, geométricas, construtivas e materiais para a abordagem da modelagem no projeto arquitetônico. Não só direcionar o ensino da modelagem, mas ter uma abordagem integrada entre modelagem digital e todas as questões que envolvem o projeto de arquitetura.

Em relação ao ensino de projeto, é comum no contexto de cursos de arquitetura a adoção do Project Based Learning, em que se acredita que os alunos aprendem por meio do desenvolvimento de um projeto e o professor se faz presente apenas nos momentos necessários, tornando o ensino um processo de autoaprendizagem (SYMEONIDOU, 2018). Em seu trabalho, Florio (2011) detalha duas atividades práticas de ensino que integram o desenho paramétrico juntamente com o projeto de arquitetura. Ao fazer isso, descreve a metodologia abordada de forma a evidenciar que os estudantes são os agentes principais nesse processo, sendo os professores atuantes apenas em momentos pontuais.

Florio (2011) acredita no processo de ensino-aprendizagem como o equilíbrio entre a transmissão de conhecimento do professor para o aluno e a consolidação desse saber por parte dos estudantes, através da resolução de problemas (atividades práticas). De forma que, segundo o autor, a cognição esteja justamente nesse último processo, em que o estudante passa a assimilar o conhecimento durante a realização da atividade. Isso caracteriza, então, o que Symeonidou (2018) aborda como Experiential Learning Theory (ELT) do Kolb, no qual a aprendizagem é o processo em que o conhecimento é criado através da transformação da experiência. Com isso, a autora acredita que a aprendizagem é gerada através de um ciclo: conceito (abstrato) – experimentação ativa (teórica) – experiência concreta (teste) – observação (reflexão).

A mudança do processo de aprendizagem, partindo da escuta (passiva) dos estudantes para um conhecimento (ativo), em que a teoria e a prática se tornam modelos que se completam para a significação do conhecimento, faz com que os estudantes tenham um maior envolvimento (SYMEONIDOU,

2018). Este modelo, quando aplicado ao desenho paramétrico, a etapa passiva de aprendizagem são as aulas teóricas, momento de explicação dos conceitos por parte dos professores, enquanto que o momento de conhecimento ativo é a compreensão das propriedades geométricas durante a modelagem, oportunidade em que os alunos podem visualizar cada alteração e peculiaridade na geometria/forma.

A dificuldade em abordar os novos processos digitais está na organização, o arquiteto enfrenta uma barreira na rigorosidade do pensamento lógico e sequencial da modelagem paramétrica (FLORIO, 2011). Seifert e Petzold (2018) constataram que, apesar de os estudantes saberem os conceitos necessários para as atividades, ainda encontravam dificuldade em aplicá-los de forma positiva para o processo de aprendizagem, agregando conhecimento à atividade. Nesse sentido, os autores sugerem que a barreira no ensino de programação ocorreu quando os estudantes adquirem uma bagagem significativa de conhecimento adicional de uma só vez na tentativa de entender a linguagem de programação. Essa barreira acontece no início, quando os estudantes se deparam com elementos de linguagem sintática (SEIFERT; PETZOLD, 2018). Ou seja, a dificuldade está em compreender e se adaptar à uma nova maneira de pensar o projeto, não só saber lidar com os elementos que integram o projeto, mas perceber suas relações.

Florio (2011) acredita que a compreensão da sequência lógica da abordagem computacional não é a única dificuldade na inserção do desenho paramétrico ao ensino de arquitetura. Segundo o autor, também se faz necessário uma maior flexibilidade de pensamento para abstrair as variações dos parâmetros e compreender as potencialidades do design proposto. E, para Seifert e Petzold (2018), se faz fundamental o ensino de geometria, pois este reduz a necessidade de o aluno se deparar com o problema de linguagem e de conteúdo (geométrico) ao mesmo tempo, pois quando o estudante já domina o conhecimento geométrico, é só questão de adaptar esse saber para a linguagem da ferramenta paramétrica.

Para o mesmo autor, quando os professores se tornam capazes de compreender os obstáculos dos estudantes no processo de projetar com tecnologias de programação, encontram alternativas para que a aprendizagem se torne uma atividade mais fluída para os estudantes. Entende-se que o ensino do projeto paramétrico abordado a partir da relação entre os conceitos de geometria e as 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.

3. 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 processo de ensino 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 em processos de ensino, integrar de maneira mais ampla os saberes científicos com 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 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 forma a contribuir para a formação do conhecimento prático em arquitetura. E para isso busca-se compreender a estrutura que está por trás desse saber, como Chevallard (1999) estabelece na Teoria Antropológica da Didática, a partir de quatro elementos: problemas (conjunto de tarefas); técnicas de resolução deste problema (o saber fazer aplicado as tarefas); tecnologias que explicam, justificam e suportam as técnicas (o saber teórico que justifica e explica porque as técnicas funcionam para uma dada tarefa ou problema); e teorias 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).

4. 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 algoritmicamente 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 tem 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 abóbodas 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 de 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 que essas formas cada vez mais complexas se manifestassem com maior recorrência 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).

4.1 Aplicação de Malhas na Geometria Complexa da 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 a 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 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 1, são apresentadas duas malhas que se aproximam de uma mesma forma, sendo uma mais equilibrada que a outra, segundo tais autores.

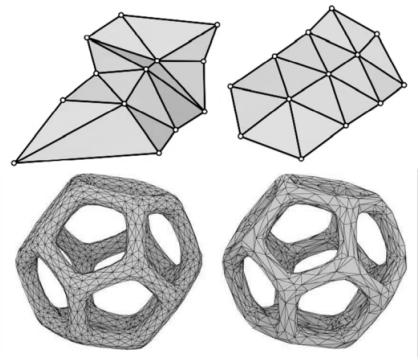


Figura 1 A conectividade das malhas. Porção superior: Malhas triangulares com a mesma conectividade, mas que representam formas geométricas bastante diferentes. Porção inferior: Duas malhas triangulares com a mesma forma, mas com uma conectividade muito diferente, o que influencia na aparência visual da malha. Fonte: Pottmann et al (2007).

Então, mais importante do que os elementos que compõe a malha, Pottman et al (2007) e Luo (2014) valorizam sua topologia, 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) consideram a importância de especificar os seus vértices e a maneira que 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).

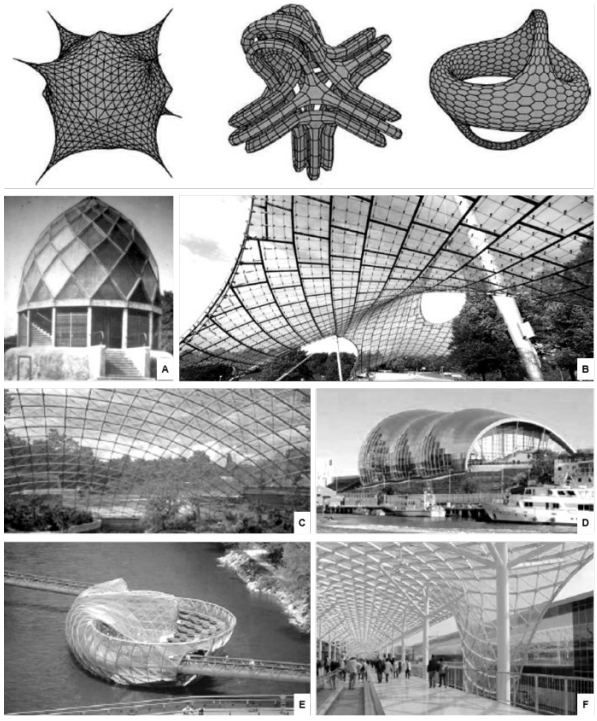


Figura 2 Exemplos de malhas e seus usos na arquitetura. Na primeira linha, malhas de diferentes tipos de polígonos: triangulares, quadriláteros e hexágonais. Na segunda, terceira e quarta linhas: (A) O Pavilhão de Vidro (1914) de Bruno Taut; (B) O Estádio Olímpico de Munique (1972) por Frei Otto; (C) 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. Fonte: Pottmann et al (2007).

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.

Quanto à regularidade das faces, a malhas podem ser: regulares, sendo estas as malhas formadas pela combinação polígonos regulares (POTTMANN ET AL; 2007; LIMA, 2021); irregulares (Figura 3), 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 2F), 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 por que 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 2E), 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, a relativamente pequena ilha Mur (2003) em Graz por Vito Acconci (Figura 2D).

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 3B), 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 Delaunay (Figura 3C), 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 Delaunay 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.

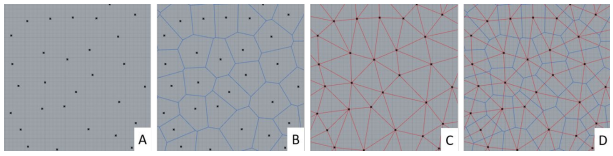


Figura 3 A: Conjunto de pontos que dá origem às conformações de malhas irregulares. B: Definição de um diagrama de Voronoi a partir do conjunto inicial de pontos. C: Triangulação de Delaunay para o mesmo grupo de pontos. D: Sobreposição das duas organizações irregulares sob o mesmo conjunto de pontos. Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4 sistematiza em um esquema visual a classificação das malhas a partir dos conceitos delimitados até o momento.

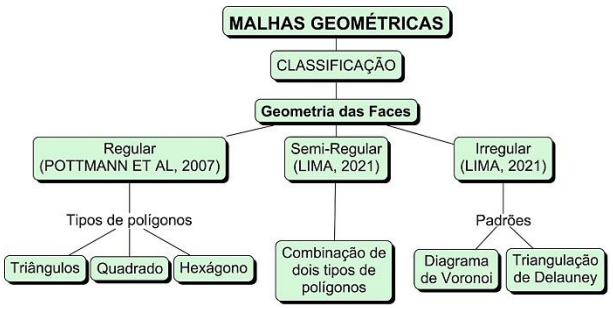


Figura 4 Classificações das malhas quanto à conexão e geometria das faces. Fonte: Elaboração própria.

4.2 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. Ele 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 forma 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 maneira 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 apresenta algumas 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 esta 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 manipulação dessa geometria na busca de formas otimizadas visualmente (PAN *ET AL.*, 2016) e 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. 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 5, sistematizam-se as aplicações de malhas geométricas na arquitetura, como resultado da revisão de bibliografia.

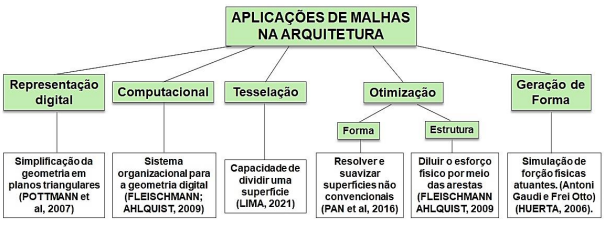


Figura 5 Tipos de aplicações das malhas na arquitetura. Fonte: Elaboração própria

5. UMA ESTRUTURAÇÃO PRÉVIA DO SABER

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 própria maneira que o desenho paramétrico é

desenvolvido, além de oferecer elementos explícitos à prática projetual em arquitetura 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 6 A) que possui uma estrutura resultante da aplicação de forças físicas (MATSYS, 2018) sobre uma malha. Este projeto foi estudado no segundo semestre de 2020 a partir da provocação junto à atividade final da disciplina Análise e Representação de Superfícies Complexas da Arquitetura Contemporânea, do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PROGRAU), da UFPel, cuja proposta visava ao estudo e representação de uma obra configurada com uma geometria em superfície mínima atuante em compressão e tendo princípios de estabilidade estrutural. Neste contexto, foi abordado previamente um tipo similar de superfície estudada e modelada parametricamente em Mariano e Pires (2021), correspondendo com o método manual de cordas e pesos de Gaudí;
- O Estádio Olímpico de Munique (Figura 6 B), com uma estrutura que age inteiramente por esforços de tensão (BRITTO, 2012), suspensa por cabos de aço, sendo um caso contrário à estrutura em compressão da Shellstar;
- A Biosfera de Montreal (Figura 6 C), projetada por Richard Buckminster Fuller, por sua importância histórica ao ser o primeiro projeto em malha construído com o conceito de geodésica (LANGDON, 2018);
- O Eden Project (Figura 6 D), por adotar uma malha hexagonal para simplificar e estruturar a forma, sendo o equivalente digital para o método de bolhas de sabão de Frei Otto (EDEN, 2021);
- A cobertura do Museu Britânico (Figura 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);
- Uma obra com 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). O projeto do Centro Aquático Nacional de Pequim (Water Cube, Figura 6 F) tem sua origem em uma malha poliédrica, assumindo um volume, com a intenção de preencher o espaço uniformemente (BURRY e BURRY, 2010) em um diagrama de Voronoi tridimensional.

Na sequência, buscou-se caracterizar cada obra a partir dos conceitos e propriedades identificados e apresentados anteriormente na revisão. A Tabela 1 traz a classificação da geometria das faces das malhas de cada um dos projetos.

O primeiro projeto, Shellstar, se caracteriza por apresentar uma malha com faces predominantemente hexagonal (MATSYS, 2018). Segundo Blanco (2022), a membrana que cobre o Estádio Olímpico de Munique é de acrílico, constituída de elementos quadrados de 75x75cm. A Biosfera de Fuller é caracterizada por ter origem no icosaedro, mas devido a fragmentação de suas faces em triângulos equiláteros, sua forma poliédrica passa a ser percebida como curva, remetendo a imagem da esfera (LANGDON, 2018). Já o Eden Project, apresenta uma malha hexagonal, mas que possui um pentágono ímpar para fechamento no topo (EDEN, 2021). A cobertura do Museu Britânico é construída como um conjunto de triângulos distintos, porém estes não são iguais, tendo configurações distintas obtidas através de processos de relaxamento e otimização da malha (BURRY; BURRY, 2010). E, por fim, o Water Cube que tem sua fachada marcada por uma malha tridimensional irregular, definida por intermédio da aplicação do diagrama de Voronoi (MICOOGULLARI, 2018).

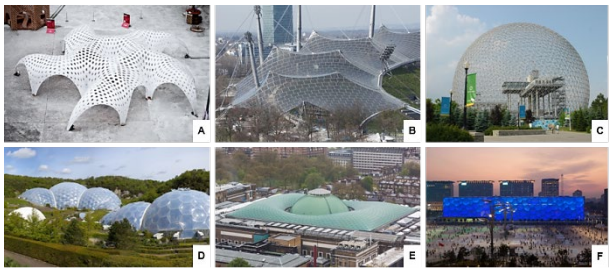


Figura 6 Obras selecionadas. A: Shellstar. B: Estádio Olímpico de Munique. C: Biosfera de Montreal. D: Eden Project. E: Cobertura do Museu Britânico de Londres. F: WaterCube. Fonte A: Matsys (2018). Fonte B: Janberg (2011). Fonte C: Wu (2005). Fonte D: Eden (2021). Fonte E: Clarke (2013). Fonte F: PTW Architects (2022). Acesso em: 21 de set. 2021

Tabela 1 Identificação das geometrias presentes nas faces das malhas em projetos de arquitetura.

Análise dos projetos quanto a geometria das faces

		 Shellstar	 Estádio Olímpico de Munique	 Biosfera de Montreal	 Eden Project	 Cobertura do Museu Britânico	WaterCube
Geometria das Faces							
Regular	Triangulo						
	Quadrado						
	Hexágono						
Semi Regular							
Irregular	Diag. de Voronoi						
	Triang. de Delauney						

Fonte: Elaboração própria. Imagens: Matsys (2018); Britto (2012);Beauvois (2011); Eden (2021); Foster+Partners (2022); Ziegler (2013).

A Biosfera de Montreal e o Eden Project apresentam duas camadas de malhas, com geometrias distintas. Enquanto a Biosfera de Fuller conta com faces triangulares na parte externa, sua malha interna apresenta uma estrutura hexagonal (BOAKE, 2008). Em contrapartida, Eden Project apresenta as formas em ordem inversas, suas faces externas são hexagonais e a estrutura interna é uma combinação de triângulos e hexágonos (EDEN, 2021). Além dessa classificação inicial quanto à geometria das faces, foram identificadas as principais justificativas do emprego de malhas nesses projetos a partir da análise de discurso dos responsáveis. Apesar de se ter identificado um conjunto de conceitos e aplicações que são mais significativos em cada um dos projetos, estes acabam sendo definidos por uma combinação de tais conceitos. Inicialmente os discursos apresentam uma das aplicações em destaque na obra, mas ao longo das análises se observa a presença das demais, a partir de justificativas que estão implicitamente associadas a tais aplicações. Com isso, ao sistematizar a classificação das malhas nos projetos (Tabela 2), reúne-se o conjunto de aplicações que englobam o projeto. Tais resultados, apesar de avançarem em relação ao discurso explicitado pelos responsáveis dos projetos, são resultados ainda introdutórios da estrutura de saber, mas que já foram

identificados relativamente às definições das formas envolvidas em cada obra.

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						

Tabela 2 Identificação das funções/aplicações das malhas em projetos de arquitetura. Fonte: elaboração própria.

Conforme explicitado na Tabela 2, a utilização de malhas nos projetos tem diferentes justificativas e aplicações. O Eden Project e a cobertura do Museu Britânico empregam malhas como representação digital para simplificar a geometria. No caso do Eden Project, a geometria busca alcançar o formato de uma superfície mínima (Carmo, 1987) semelhante as bolhas de sabão, baseado nos estudos de Frei Otto (EDEN, 2021). 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 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, 2018; 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, resultando em mudanças visuais do modelo (ZAVATTIERI; DARI; BUSCAGLIA, 1996). Na Shellstar e na Biosfera, foram empregadas técnicas de refinamento da malha, aumentando a quantidade de faces (MATSYS, 2018; 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, 2018). 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 encontradas 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, 2018), 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 cada uma dessas obras.

6. 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. A pesquisa fica assim 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;
2. Definição do corpo de análise a partir da revisão de literatura;
3. Análise do discurso dos projetistas de cada obra;
4. Reconhecimento do processo de projeto de cada obra e explicitação da estrutura de saber a partir dos conceitos envolvidos nos projetos (Investigação da estrutura de saber de cada projeto);
5. Estruturação dos processos de modelagem paramétrica das obras de arquitetura com emprego de malhas;
6. Sistematização e compartilhamento do saber reconhecido/explicitado por intermédio de uma rede de conceitos online.

Inicialmente foi realizada uma revisão de literatura sobre malhas na arquitetura, conforme apresentado anteriormente, revisando-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. Ao mesmo tempo, recorre-se a autores como Luo (2014) e Lima (2021) para relacionar as diversas abordagens e compreender as diferentes finalidades e critérios para a aplicação das malhas na arquitetura.

Por meio de uma abordagem dos conceitos geométricos em casos específicos, é possível aproximar o ensino e a prática em arquitetura de maneira construtiva, com isso, passa-se a definir o corpo de análise que sustentará esta pesquisa. Para isso, serão analisados os projetos definidos 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 poderá ser definida após todo o processo de análise das obras; no entanto, inicialmente, já foi possível identificar uma obra em que sua geometria é configurada com uma superfície esférica que tem por base um poliedro platônico, a Biosfera de Montreal, de Buckminster Fuller, e que adota o conceito de geodésica, 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, até o momento definidos na seguinte sequência: O Eden Project, por Grimshaw Architects; o Estádio Olímpico de Munique, de Frei Otto; a cobertura Museu Britânico de Londres, por Foster and Partners; Shellstar, de Matsys; e o Centro Aquático Nacional de Pequim, por PTW Architects da Austrália. Destaca-se que já foi possível identificar uma relação geométrica entre a Biosfera e o Éden Project, pois este último adota biosferas interseccionadas em suas coberturas de malhas.

A partir do discurso dos arquitetos responsáveis pelos projetos, sites e obras literárias de arquitetos e pesquisadores, buscar-se-á 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. Além disso, também se propõe uma aplicação prática dos processos de modelagem paramétrica dessas obras, para reforçar a estrutura do saber identificada em cada um dos casos. Essas diferentes abordagens serão consideradas para então se constituir como uma estrutura integral do saber.

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. É pressuposto que a transposição do saber teórico para o saber ensinado relativamente 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.

7. A GEOMETRIA ARQUITETÔNICA DA BIOSFERA DE MONTREAL (1967)

Projetada inicialmente como um pavilhão temporário para a Exposição Mundial em 1967 e idealizada por Richard Buckmisnter Fuller, juntamente com Shoji Sadao e Geometrics Inc., a Biosfera de Montreal (Figura 7) 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 7 Vistas da Biosfera em Montreal. Fonte: Roletschek, 2017; Nunes, 2016a; Nunes, 2016b.

O conceito para a Biosfera de Montreal tem origem no contexto social e filosófico abordado por Fuller (LANGDON, 2014). 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 sinergética, 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 sinergética 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 (2014), 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 aos sólidos platônicos devido a sua 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, consequentemente, 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 8) na circunsfera - esfera que circunscreve 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 (LANGGDON, 2014). 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.

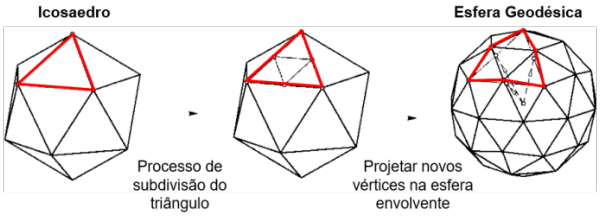


Figura 8 Processo de subdivisão das faces e projeção dos novos pontos. Fonte: Pottmann *et al.* (2007).

A divisão das faces do icosaedro assume uma etapa importante nesse processo, 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 interativas 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 9A), pode ser dividido em quatro triângulos também equiláteros menores (Figura 9B), 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 8) para obter uma geodésica que Pottmann *et al.* (2007) chama de nível 1 (Figura 9F).

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 9C). Novamente os pontos são projetados na esfera que envolve o icosaedro para obter uma geodésica, dessa vez de nível 2 (Figura 9G).

Pottmann *et al.* (2007) repete o processo, 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 9D). Projeta seus pontos e define a geodésica agora de nível 3 (Figura 9H). Com isso o autor define uma fórmula para calcular a quantidade de triângulos: para uma geodésica de nível k, serão estabelecidos $20(k+1)^2$ triângulos.

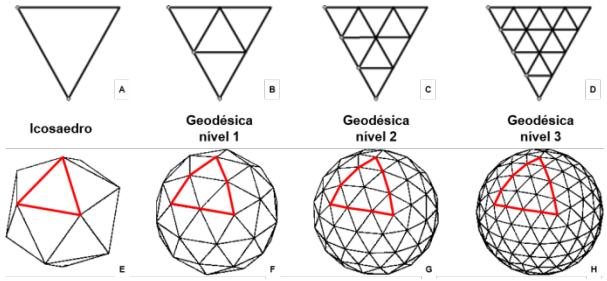


Figura 9 Subdivisão de um triângulo em triângulos menores (porção superior) e esferas geodésicas geradas a partir da projeção de tais faces. Fonte: Pottmann *et al.* (2007).

Enquanto Pottmann *et al.* (2007) caracteriza a etapas como sendo o nível de uma geodésica, demais autores, como Langdon (2014) e Edmondson (1987), se apropriam do termo "frequência" para caracterizar essa subdivisão da geodésica. No entanto, 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 (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 ($20. f^2$).

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 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, 2014). A conexão entre as camadas (Figura 10) ocorre por meio de arestas com origem nos vértices dos hexágonos (camada interna) que se juntam em cada um dos vértices dos triângulos (camadas externas).

Além disso, Massey (2016) relata a existência de uma camada intermediária em aproximadamente um terço dos hexágonos, formada por painéis acrílicos e persianos triangulares motorizados, 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, 2014). Segundo Massey (2016), a estrutura geodésica e o sistema de autorregulagem 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 essa combinação como a aproximação da Biosfera ao funcionamento do corpo humano, pois se autorregulava para manter a temperatura interna constante. Nesse sentido, Fuller colocou em prática as questões de otimização que estudava com a sinergética através de uma solução arquitetônica.

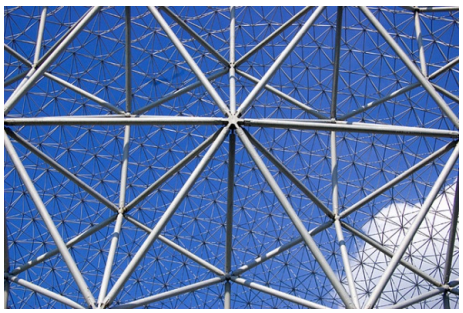


Figura 10 Detalhe de conexão entre as duas camadas de malhas. Fonte: Brown (2006).

Apesar dos esforços de Fuller, segundo Langdon (2014), 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 diferentes tamanhos e materiais ao redor do mundo, Edmondson (1987) pontua que a geometria sinergética por trás da obra de Fuller continua esquecida e confusa, enquanto que Landgon (2014) destaca que o arquiteto não atingiu a meta de aplicação em massa prevista em seus estudos.

7.1 Estrutura de Saber da Biosfera de Montreal

Inicialmente, desenvolveu-se um esquema visual que apresenta uma estrutura de saber teórica referente à geometria da Biosfera de Montreal, de Fuller (Figura 11). Nesse esquema são apresentados, à esquerda, os termos chave identificados nos autores de referência, os quais se relacionam com a sequência de etapas para a geração da geodésica estudada (processos de representação descritos em Pottmann *et al.* (2007), Langdon (2014), Kenner (1976) e Edmondson (1987)). O esquema visual ordena-se no sentido vertical e horizontal, apresentando, respectivamente, os conceitos mais abrangentes e as especificidades de cada conceito/etapa de geração, incluindo-se, na coluna à direita, descrições e justificativas de cada estágio identificado.

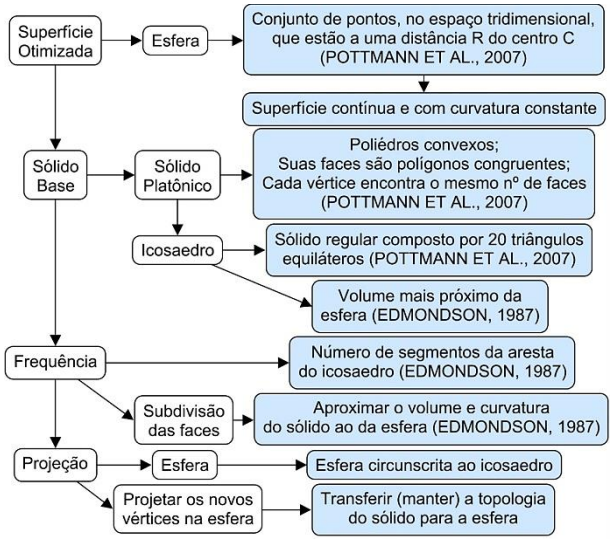


Figura 11 Esquema com uma estrutura de saber teórica da Biosfera.

Tal esquema visual representa a lógica de pensamento de Fuller ao construir a geometria da geodésica: o ponto de partida é exatamente a geometria almejada (uma esfera), nesse caso a otimização geométrica por intermédio de uma superfície. Para se aproximar desse ideal, o arquiteto partiu de uma forma que é, simultaneamente, conhecida e também concebida a partir de elementos regulares e congruentes, que facilitam sua construção, o icosaedro. Para então ser introduzido o conceito de frequência e projeção, ambos utilizados para aproximar a geometria base da esfera, superfície tão almejada por Fuller.

Nesse contexto a esfera é, ao mesmo tempo, o ponto inicial e final da concepção de Fuller para a estrutura da Biosfera. É a superfície a ser alcançada, mas que somente pode ser desenvolvida em uma aproximação da forma, devido ao objetivo de construí-las racionalmente por meio de elementos retilíneos, visando a redução de custo e, ao mesmo tempo, poderem ser facilmente replicadas.

Em um segundo momento, com o intuito de expandir essa estrutura do saber inicial, até então concentrado nas definições e explicações teóricas sobre a geometria da obra, parte-se para o reconhecimento das técnicas de geração em conjunto com as tecnologias, a partir de uma proposta de modelagem paramétrica conceitual da Biosfera de Montreal. Esta modelagem adotou a lógica descrita nas etapas conceituais (Figura 11), tendo-se como resultado uma programação visual (Figura 12). Na sequência serão apresentadas e descritas cada uma das etapas e suas explicações.

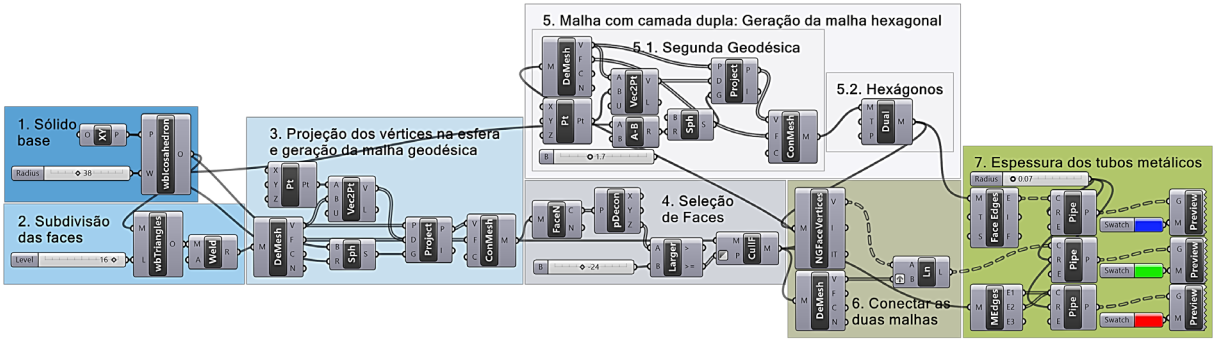


Figura 12 Programação visual da Biosfera de Montreal.

Partindo-se das definições de Pottmann *et al.* (2007) para a geodésica, iniciou-se a programação pela representação do sólido platônico utilizado como base de tal geometria (o icosaedro). A justificativa de não adotar variações deste sólido base, conforme pressupõe um modelo paramétrico, está no fato de este ser a geometria inicial escolhida por Fuller no projeto. A primeira etapa (ilustrada na Figura 13) apresenta 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 14. 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 13, 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 14) em cada face e 5.120 no total (imagem ao centro da mesma Figura 14). 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 14, apresentando a visualização do sólido inteiro e um detalhe da face do icosaedro com as subdivisões.

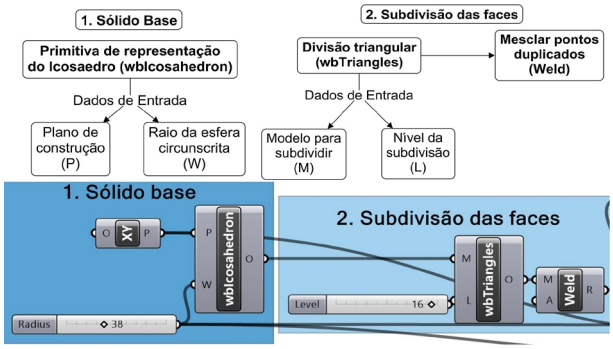


Figura 13 Esquema visual das etapas 1 e 2 da modelagem da Biosfera.

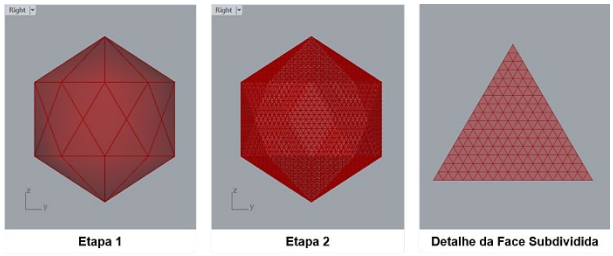


Figura 14 Representação gráfica das etapas 1 e 2 da modelagem da Biosfera.

Na sequência, é desenvolvida a etapa 3 (Figura 15) 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 16, para então efetivamente aplicar a projeção (imagem central da Figura 16). Ao fim da etapa 3 a malha é reconstruída a partir da nova posição dos vértices (imagem mais à direita da Figura 16) 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.

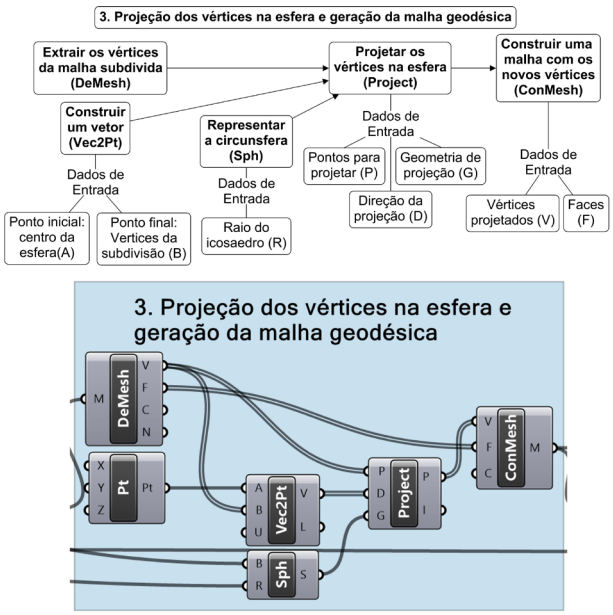


Figura 15 Esquema visual da etapa 3 da modelagem da Biosfera

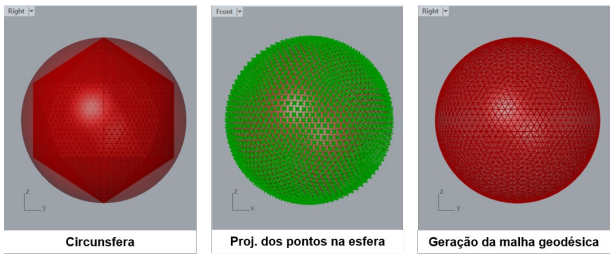


Figura 16 Representação gráfica da etapa 3 da modelagem da Biosfera.

Até este momento foi estruturada a malha que define a esfera geodésica inteira, mas 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 17, 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 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.

Como não se encontraram registros oficiais 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.

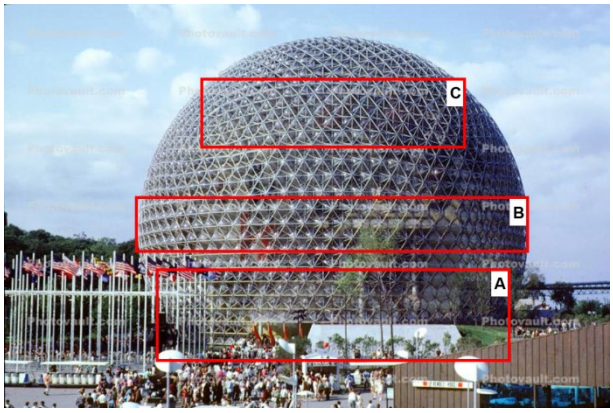


Figura 17 Fotografia da Biosfera de Montreal.

Fonte: Modificado a partir de Krutein (c2022).

A Figura 18 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 19, 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 19), sendo necessário remover as faces que não foram selecionadas.

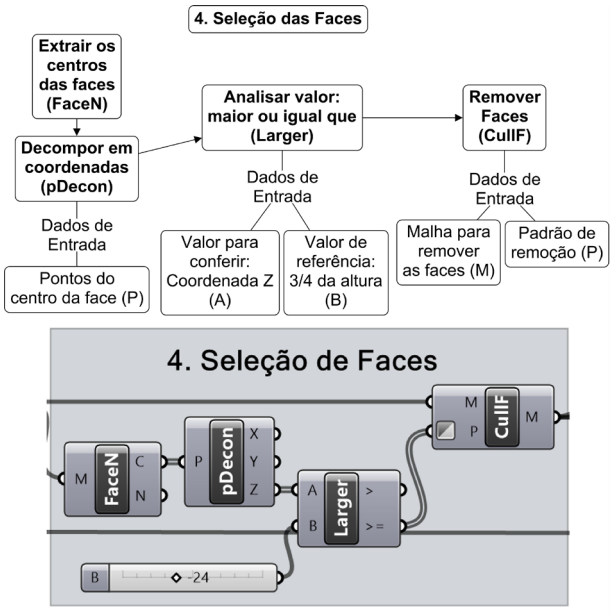


Figura 18 Esquema visual da etapa 4 da modelagem da Biosfera.

Até este momento foi desenvolvida a modelagem da malha triangular que define a Biosfera. No entanto, 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 à 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.

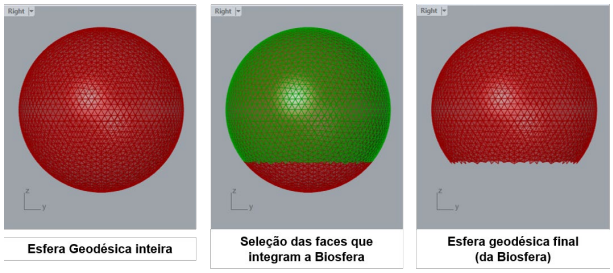


Figura 19 Representação gráfica da etapa de seleção das faces da modelagem da Biosfera.

Para definir a malha hexagonal busca-se informações a partir de uma representação esquemática de corte do projeto (Figura 20). 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.

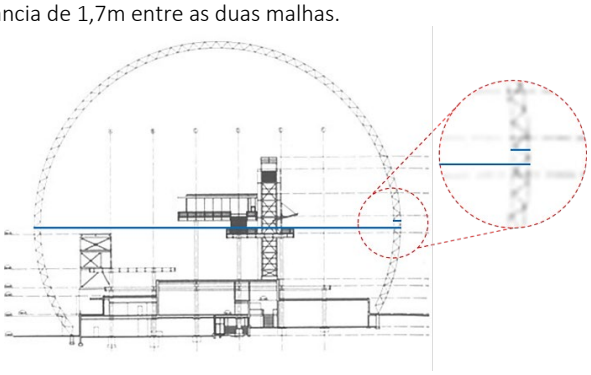


Figura 20 Corte esquemático da Biosfera de Montreal.

Fonte: Modificado a partir de Montreal (2016).

A Figura 21 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 (imagem à esquerda da Figura 22, a camada interna ainda triangular está 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 22). 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 Rhinoceros, 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 Rhinoceros é entendido como um conjunto de 6 faces triangulares e planas.

Depois, 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 23. 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).

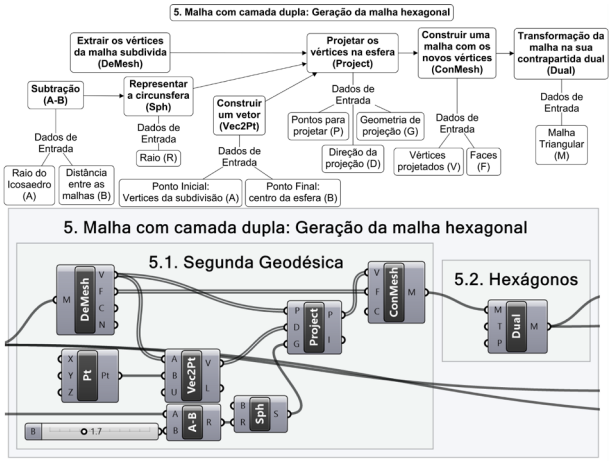


Figura 21 Esquema visual da etapa 5 da modelagem da Biosfera.

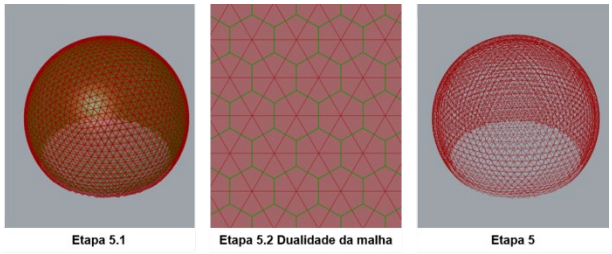


Figura 22 Representação gráfica da etapa 5 da modelagem da Biosfera.

E, por fim, também na Figura 23 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 24 ilustra, respectivamente, um detalhe da estruturação da malha, o modelo final e um detalhe da composição da malha, ambos em perspectiva.

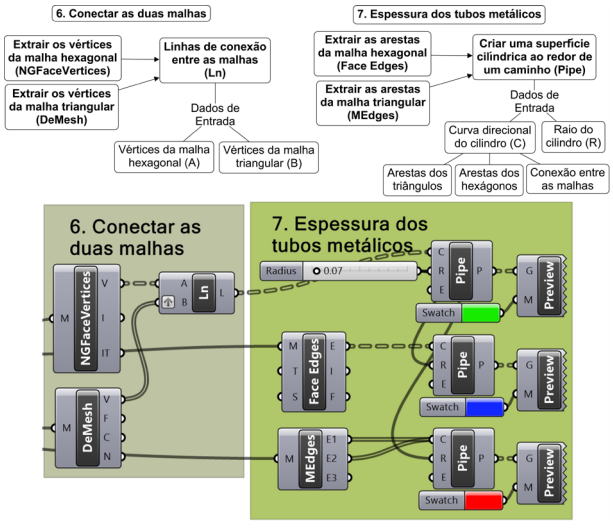


Figura 23 Esquema visual das etapas 6 e 7 da modelagem da Biosfera.

A ideia inicial de Fuller com a Biosfera de Montreal foi de transformar seu projeto em um modelo para a difusão da sinergética, 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 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.

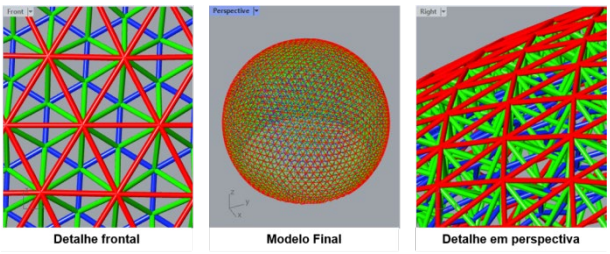


Figura 24 Representação gráfica das etapas finais da modelagem da Biosfera.

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.

7.2 Revisão da classificação 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 nesse 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 1.1). Já era de conhecimento 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 se avança no saber identificado e considera-se a estrutura mais complexa. Desse modo, além da camada já conhecida, também foi destacada (em verde) na Tabela 3 a classificação hexagonal da malha presente na Biosfera, devido a sua importância estrutural. Então, a Biosfera apresenta duas classificações quanto as faces, uma para cada camada de malha.

Tabela 3 Classificação da Biosfera de Montreal quanto à geometria das faces da malha. Fonte: elaboração própria.

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

Quanto a função das malhas, foram identificados novos usos que justifiquem sua aplicação no projeto. Nesse sentido, na Tabela 4 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 Função da malha na Biosfera de Montreal. Fonte: elaboração própria.

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

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, ocorre tanto na definição da frequência como durante a projeção dos vértices das faces na circunsfera, pois essas etapas modificam a forma, alterando a posição dos elementos sem alterar suas conexões, para aproximar o icosaedro de uma geometria otimizada, a esfera. Por fim, em relação a otimização estrutural, presente na concepção da forma, que é baseada nos estudos de Fuller sobre tensegridade, isso quer dizer que promove uma estrutura estável e capaz de transferir a força por todos seus elementos, garantindo peças com diâmetros menores e ainda assim resistentes às solicitações de esforços. Além disso, 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.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a crescente demanda para que a arquitetura esteja alinhada com as questões ambientais e econômicas, torna-se essencial que a formação nessa área aborde tais aspectos de maneira interdisciplinar. Isso inclui o ensino de representação gráfica digital, que também pode contribuir com uma formação mais integrada a essas questões. É importante compreender que a estrutura de saber relacionada à representação pode integrar conceitos que envolvam a concepção de projetos com melhor desempenho ambiental e econômico reduzindo o impacto dos materiais utilizados e promovendo a eficiência ao longo da vida útil dos edifícios.

Nesta pesquisa, o interesse é o estudo de geometrias da arquitetura que possuam tais propriedades e que estão sendo utilizadas em projetos referenciais. Além desse estudo, a pesquisa tem um interesse didático para a arquitetura, considerando que a partir da explicitação do saber envolvido na estrutura geométrica de obras referenciais é possível levar ao ensino tais questões por meio da representação, contribuindo a uma formação mais integrante e corresponsável com as questões ambientais.

Preparar os estudantes para o uso das novas tecnologias requer avanços nos materiais didáticos, especialmente quando se tratam de saberes ainda não reconhecidos no contexto educacional. A combinação do uso da programação visual com uma estrutura de saber que introduz os principais conceitos geométricos permite 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 desta associando-a a outras estruturas relacionadas, amplia as possibilidades de os estudantes explorarem as tecnologias digitais de representação na elaboração de seus projetos. Dessa maneira, faz-se indispensável a contribuição de tais estruturas para a proposição também de materiais didáticos que abordem o saber da geometria e da representação gráfica digital, voltados a vários níveis de formação em arquitetura.

Dessa maneira, é possível aproximar os estudantes do vocabulário geométrico necessário para lidar com algumas das geometrias complexas da arquitetura contemporânea e com o projeto paramétrico subjacente a elas, adotando uma abordagem interdisciplinar que promova uma visão mais holística da arquitetura.

Na sequência da pesquisa, o mesmo tipo de estudo será feito para os demais projetos de arquitetura, visando explicitar a estrutura de saber que integra outras funções e aplicações das malhas na concepção, representação e construção arquitetônicas.

REFERÊNCIAS

1. 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.

2. 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

3. 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.

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

5. 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.

6. 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.
7. 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
8. 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.
9. BROWN, Nathan; MUELLER, Caitlin. Quantifying diversity in parametric design a comparison of possible metrics. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing** v. 33, ed. 1, p. 40–53, 2019. DOI: 10.1017/S0890060418000033.
10. BRUNDTLAND, Gro Harlem. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. **United Nations General Assembly document A/42/427**, 1987BURRY, Jane; BURRY, Mark. The new mathematics of architecture. Thames & Hudson. 2010
11. BURRY, Jane; BURRY, Mark. **The new mathematics of architecture**. Thames & Hudson. 2010
12. 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.
13. CARMO, M. P. **Superfícies Mínimas**. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA, 1987.
14. 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.
15. CELANI, G; BARBOSA NETO, W; FRANCO, J. M. S. **Do projeto à fabricação**. Entrevista com Peter Mehrtens. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M (Organizadores). Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão. São Paulo: ProBooks, 2018. p. 182-188.
16. CHEVALLARD, Y**. La Transposición Didáctica**: del saber sabio al saber enseñado. La Pensée Sauvage, Argentina, 1991.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. EDEN Project. **Eden Project**, 2021. Architecture. Disponível em: <https://www.edenproject.com/mission/about-our-mission/architecture/>. Acesso em: 20 de set. de 2021.
21. 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.
22. 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.
23. FIRBY, Peter; GARDINER, Cyril**. Surface Topology**. 3. ed. rev. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2001. 270 p. ISBN 1898563772.
24. 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.
25. 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
26. 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.
27. 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.
28. HERNANDEZ, Carlos Roberto. Parametric Gaudi. SIGraDi 2004, **Proceedings of the 8th Iberoamerican Congress of Digital Graphics**, Porte Alegre, Brasil, 2004.
29. HUBERS, J.C. Collaborative Design of Parametric Sustainable Architecture. **International Workshop on Computing in Civil Engineering 2011**, Miami, Estados Unidos, p. 413-420, 2011.
30. 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
31. HUERTA, S. Structural Design in the Work of Gaudi. **Architectural Science Review**. V. 49.4, pp. 324-339, 2006.
32. 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
33. 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.
34. 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.

35. 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.

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

37. 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.

38. 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.

39. 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

40. LEOPOLD, Cornelie. 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

41. 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.

42. 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.

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

44. 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.

45. 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

46. 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.

47. MATSYS. **Shellstar Pavilion**. 2018. Disponível em: https://www.matsys.design/shellstar-pavilion. Acesso em: 23 dez. 2020.

48. 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.

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. 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.

53. 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.

54. 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

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

56. 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.

57. 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

58. 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

59. PIRES, Janice de Freitas; FELIX, Luisa Dalla Vecchia; SILVA, Adriane Borda Almeida da. Tecnologias de representação e geometria descritiva: reflexões sobre um repertório docente dirigido à arquitetura. **Revista Educação Gráfica**, v. 20, pp. 212-231, 2016.

60. 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.

61. 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.

62. PLÁCIDO, Isabel; ELOY, Sara. Um Modelo Planar para a Comunicação à Obra do Projecto de Arquitectura. In **SIGraDi'2000 – Construindo (n)o espacio digital (constructing the digital Space)** p. 227-229. 2000. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/data/works/att/191a.content.pdf>. Acesso em: 12 de abril de 2021.

63. 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.

64. 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

65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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

69. 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.

70. 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

71. 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.

72. 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.

73. STALS, Adeline; JANCART, Sylvie; ELSEN, 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

74. 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

75. SYMEONIDOU, Ioanna. Furniture Design with Digital Media: A participative educational experiment of digital craftsmanship. Kepczynska-Walczak, A, Bialkowski, S (eds.), Computing for a better tomorrow (**Proceedings of the 36th eCAADe Conference),** volume 2, Lodz University of Technology, Lodz, Poland, 19-21 September 2018, p. 417-426. Disponível em: http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2018_380. Acesso em: 13 jul. 2020.

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

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

78. 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

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

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

81. ZAVATTIERI Pablo, DARI Enzo, BUSCAGLIA Gustavo. Optimization strategies in unstructured mesh generation.

82. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 39, p. 2055 –2071, 1996

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