

APLICAÇÃO DE MALHAS NA CONFIGURAÇÃO DE GEOMETRIAS COMPLEXAS DA ARQUITETURA: O CASO DA BIOSFERA DE MONTREAL

APPLICATION OF MESHES IN THE CONFIGURATION OF COMPLEX GEOMETRIES OF ARCHITECTURE: THE CASE OF THE MONTREAL BIOSPHERE

Fernando Franz Zauk¹

Janice de Freitas Pires²

Resumo

A aplicação de malhas na produção arquitetônica evoluiu desde os modelos analógicos de Gaudí e Otto, no século XX, até o emprego atual na arquitetura digital, particularmente em processos de projeto subsidiados pela modelagem paramétrica. Nesse contexto, seu papel mais significativo se revela na otimização da representação gráfica e obtenção/construção de geometrias complexas com alto desempenho estrutural. Visando contribuir a inserção de este saber na formação em arquitetura e facilitar a sua apropriação no contexto profissional, busca-se explicitar o saber relacionado com aplicações de malhas e compreender os conceitos geométricos que integram suas propriedades funcionais. É apresentado um caso referencial de arquitetura, a Biosfera de Montreal, a partir da noção estruturada do saber, de Yves Chevallard. Os resultados demonstram que a abordagem integrada entre desempenho, análise e a estruturação formal e construtiva, propiciadas pelas malhas e o desenho paramétrico, oferece uma estrutura de saber relevante para a formação atual, que necessita ser explicitada e inserida no currículo das escolas de arquitetura.

Palavras-chave: projeto paramétrico; malhas; ensino de arquitetura; Biosfera de Montreal.

Abstract

The application of meshes in architectural production has evolved from the analog models of Gaudí and Otto, in the 20th century, to the current use in digital architecture, particularly in design processes supported by parametric modeling. In this context, its most significant role is revealed in optimizing the graphic representation and obtaining/building complex geometries with high structural performance. In order to contribute to the insertion of this knowledge in architecture training and facilitate its appropriation in the professional context, we seek to explain the knowledge related to applications of meshes and to understand the geometric concepts that integrate its functional properties. A reference case of architecture is presented, the Biosphere of Montreal, based on the structured notion of knowledge, by Yves Chevallard. The results demonstrate that the integrated approach between performance, analysis and formal and constructive structuring, provided by meshes and parametric design, offers a relevant knowledge structure for current training, which needs to be made explicit and inserted in the curriculum of architecture schools.

Keywords: parametric design; meshes; architecture teaching; Montreal Biosphere.

¹ Mestrando, PROGRAU – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFPel, Pelotas, RS, Brasil, ferzauk@gmail.com; ORCID 0000-0002-2706-7315

² Professora Doutora em Arquitetura e Urbanismo, PROGRAU – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFPel, Pelotas, RS, Brasil, janicefpres@gmail.com; ORCID 0000-0002-1975-3147

1. Introdução

A aplicação de malhas na configuração de geometrias complexas não é uma abordagem sem precedentes, exclusiva do contexto da arquitetura produzida por meios digitais. Arquitetos do passado como Gaudí e Frei Otto utilizavam em seus projetos modelos físicos de corrente suspensa, formados por uma teia de cabos, para definir geometrias de alto desempenho estrutural, em uma abordagem de busca de formas (BURRY; BURRY, 2010; 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 em função do avanço dos meios digitais de representação, como a modelagem paramétrica. O autor destaca que, embora a matemática já fosse capaz de defini-las formalmente no passado, existia uma lacuna das tecnologias de representação e construção existentes na época.

Para 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, as suas relações e lógicas internas. Para os autores, o interesse na representação final do modelo cede espaço para a associação entre a geometria concebida e as soluções relacionadas aos requisitos projetuais.

Questões geométricas associadas ao desempenho da forma arquitetônica também são abordadas no contexto da arquitetura digital em alguns projetos contemporâneos direcionados a busca da sustentabilidade no emprego dos materiais de construção (BERTOL, 2011; PIRES; PEREIRA, 2019; OLIVEIRA; PIRES, 2021). Embora a importância de esta abordagem para a prática de arquitetura, os arquitetos acabam tendo que buscar uma formação específica focada em arquitetura digital e projeto paramétrico quando ingressam no contexto profissional (CELANI; BARBOSA NETO; FRANCO, 2018).

Segundo Pires, Pereira e Gonçalves (2017) a aprendizagem do projeto paramétrico exige o reconhecimento prévio do vocabulário geométrico subjacente à geração de formas, abarcando desde as geometrias mais elementares até níveis crescentes de complexidade, para promover 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 associada 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 implicações relacionadas a tais questões.

Além disso, é 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; DALLA VECCHIA; BORDA, 2016).

O objetivo do estudo é contribuir a inserção de este saber na formação em arquitetura e facilitar a sua apropriação no contexto profissional, explicitando-se o saber relacionado com aplicações de malhas e os conceitos geométricos que integram suas propriedades funcionais.

2. Metodologia

Este estudo integra uma dissertação de mestrado caracterizada 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.

O trabalho fica assim constituído pelas seguintes etapas:

- Revisão de literatura abarcando os temas geometria complexa, malhas na arquitetura e projeto paramétrico, na prática profissional, no contexto científico e no ensino (1);
- Definição do corpo de análise a partir da revisão de literatura (2);
- Análise do discurso dos projetistas de cada obra (3);
- Reconhecimento do processo de projeto de cada obra e explicitação da estrutura de saber a partir dos conceitos envolvidos nos projetos (4);
- Estruturação dos processos de modelagem paramétrica das obras de arquitetura com emprego de malhas (5);
- Sistematização e compartilhamento do saber reconhecido/explicitado por intermédio de uma rede de conceitos online (6).

Estas etapas estão sendo desenvolvidas no contexto da dissertação anteriormente referida e, neste artigo, serão apresentados os resultados das etapas 3, 4 e 5 aplicadas ao estudo de uma obra de arquitetura associada ao tema de sustentabilidade, a Biosfera de Montreal, de Fuller.

Inicialmente foi realizada uma revisão de literatura sobre malhas na arquitetura, reconhecendo-se suas características associadas à geometria. As pesquisas em matemática de Pottmann et al. (2007) aproximam a área da geometria com a prática arquitetônica e Luo (2014) e Lima (2021) relacionam as diversas abordagens das malhas, suas diferentes finalidades e critérios para a aplicação. Os resultados desta revisão prévia estão sistematizados em Zauk e Pires (2022).

A partir de tal sistematização e 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.

3. O Projeto da Biosfera de Montreal

Projetada inicialmente como um pavilhão temporário para a Exposição Mundial em 1967 e idealizada por Richard Buckminster Fuller, juntamente com Shoji Sadao e Geometrics Inc., a Biosfera de Montreal (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) 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).

Figura 1: Vistas da Biosfera em Montreal.



Fonte: Roletschek, 2017; Nunes, 2016a; Nunes, 2016b.

Fuller desenvolveu sua pesquisa da sinérgica que, segundo Bertol (2011), relaciona-se com uma condição geométrica e representa um sistema de interpretar as estratégias de matemática estruturais da natureza. É uma área do conhecimento que estuda a complexidade espacial, sendo a geometria a conexão entre a matemática e a realidade. Apesar de os pensamentos de Fuller e suas deduções desencadearem diversos entendimentos de processos da natureza, autores atuais como Pottmann et al. (2007) e Bertol (2011) descrevem sua importância para a arquitetura a partir de seus estudos geométricos.

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.

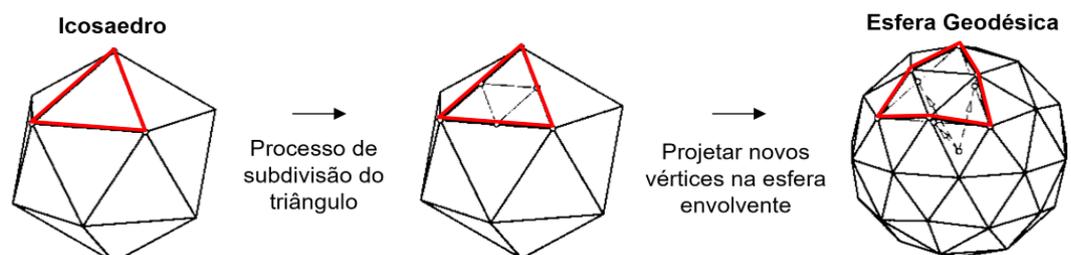
3.1. A Geometria da Geodésica de Montreal

A 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. Porém, 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 que isto está relacionado com a baixa acessibilidade ao saber matemático pelos arquitetos – ponto de partida para a obtenção de tais formas.

As geometrias geodésicas têm sua origem em diferentes sólidos poliédricos (KENNER, 1976), mas são normalmente relacionadas àqueles conhecidos como sólidos platônicos devido a sua propriedade de regularidade (POTTMANN ET AL., 2007). Alinhado com esta ideia, Fuller estabelece o icosaedro – sólido regular formado por 20 faces de triângulos equiláteros e congruentes – como o ponto de partida para a geometria de seu projeto, isso por que, dentre todos os sólidos platônicos, seu volume é o que mais se aproxima da esfera e, conseqüentemente, suas faces estão mais próximas da superfície esférica que o envolve (POTTMANN ET AL., 2007; EDMONDSON, 1987). Então, Pottmann et al. (2007) explica que cada uma das faces do sólido deve ser subdividida em um padrão triangular a ser projetado (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) na circunferência - esfera que circunscribe o sólido. Com isso, a clareza geométrica do icosaedro é ofuscada pela fragmentação de suas faces durante seu processo de curvatura, pois os elementos menores criam uma complexidade visual a partir da repetição (LANGDON, 2014). 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.

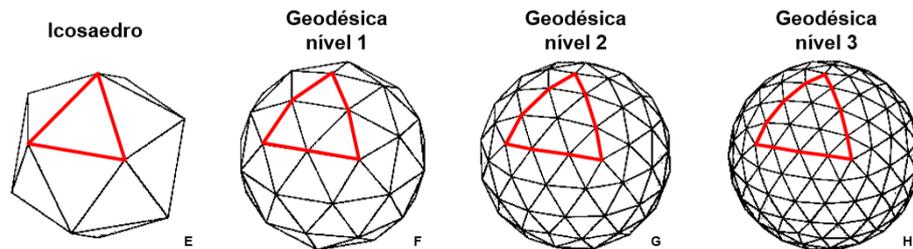
Figura 2: Processo de subdivisão das faces e projeção dos novos pontos.



Fonte: Pottmann et al. (2007).

A divisão das faces do icosaedro assume uma etapa importante nesse processo: enquanto Pottmann et al. (2007) caracteriza tais etapas como sendo o “nível” de uma geodésica, demais autores, como Langdon (2014) e Edmondson (1987), denominam como “frequência”. O “nível” se refere às etapas das divisões da aresta original (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e a frequência relaciona-se ao número de segmentos resultantes dessa divisão da aresta (uma divisão resulta em dois novos segmentos, ou seja, nível 1 tem frequência 2).

Figura 3: Subdivisão de um triângulo em triângulos menores (porção superior) e esferas geodésicas geradas a partir da projeção de tais faces.



Fonte: Pottmann et al. (2007).

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 por Fuller com uma geodésica de frequência 16. Como resultado, o arquiteto caracteriza uma geometria 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 (a forma triangular vista externamente).

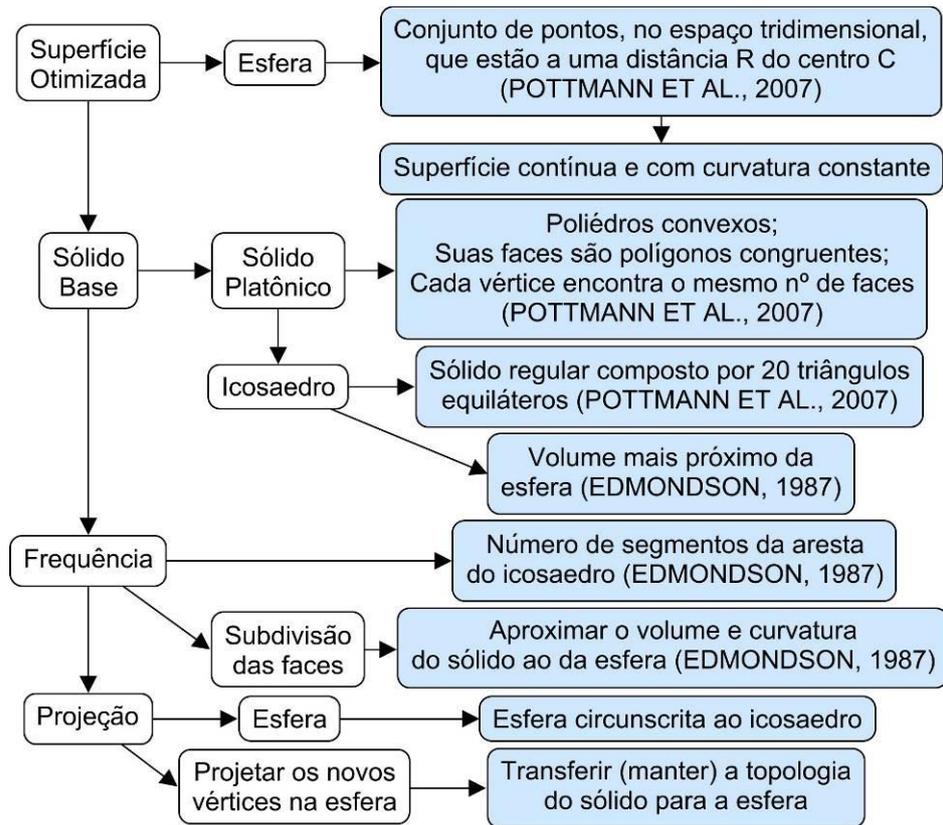
No entanto, segundo Massey (2016), está é apenas uma parte da estrutura, pois as treliças utilizadas na estrutura da Biosfera geram também um padrão hexagonal na sua face interna. Criadas inteiramente de tubos de aço de três polegadas e soldadas nas juntas, as treliças afinam suavemente em direção ao topo da estrutura para distribuir as forças de maneira ideal por todo o sistema (LANGDON, 2014).

3.2. A Estrutura de Saber da Biosfera de Montreal

Inicialmente, desenvolveu-se um esquema visual que apresenta uma estrutura de saber teórica referente à obra de Fuller (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). 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 até então.

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 à redução de custo e, ao mesmo tempo, facilitar a sua replicação.

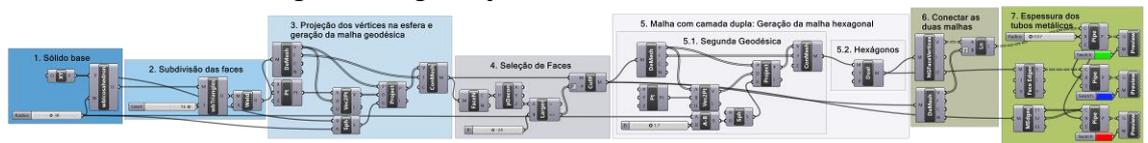
Figura 4: Estrutura de saber inicial da Biosfera de Montreal.



3.3 A Modelagem Paramétrica da Biosfera de Montreal

Visando ampliar a estrutura do saber, até então concentrada nas teorias (definições e explicações sobre a geometria da obra), faz-se o reconhecimento das técnicas de geração simultaneamente ao desenvolvimento de uma proposta de modelagem paramétrica conceitual da Biosfera de Montreal. Esta modelagem adotou a lógica anteriormente descrita nas etapas conceituais (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), tendo-se como resultado a programação visual ilustrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Na sequência são apresentadas e descritas cada uma das etapas e suas explicações.

Figura 5: Programação visual da Biosfera de Montreal.



Elaborado pelos autores.

Iniciou-se a programação pela representação do sólido platônico utilizado como base (o icosaedro). Foi gerado por meio de um modelo em malha, declarado no componente Weaverbird’s Mesh Icosahedron – disponível através do plugin Weaverbird, de Piacentino (2009) -, cujas faces são as faces do sólido platônico (imagem à esquerda da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

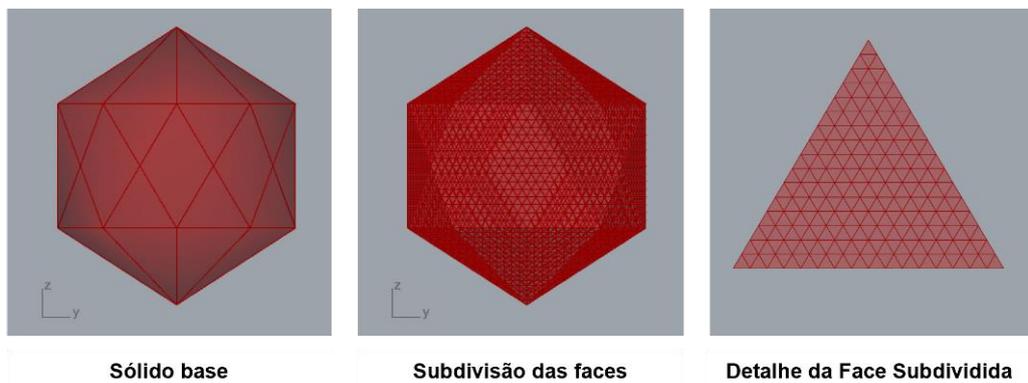
Após, na etapa 2, define-se a frequência da geodésica (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e, para corresponder à geometria da Biosfera, as arestas iniciais do sólido platônico são divididas em dezesseis segmentos de retas menores (imagem à direita da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) em cada face. 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, apresentando as visualizações do sólido inteiro e uma face do icosaedro com as subdivisões.

Figura 6: Esquema visual das etapas 1 e 2 da modelagem da Biosfera.



Elaborado pelos autores.

Figura 7: Representação gráfica das etapas 1 e 2 da modelagem da Biosfera.



Elaborado pelos autores.

Na etapa 3, (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), os novos vértices (dos triângulos oriundos da subdivisão) são projetados em uma geometria (a esfera que circunscribe o icosaedro). Para isso se estabelece o vetor direção da projeção para cada vértice, a partir do centro do icosaedro/esfera até o próprio vértice. Depois se define a superfície de projeção (imagem à esquerda da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), para então efetivamente aplicar a projeção (imagem central da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Ao fim desta etapa, a malha é reconstruída a partir da nova posição dos vértices (imagem à direita da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e mantendo constantes as conexões entre eles, ou seja, a maneira como cada ponto se relaciona não é modificada no processo, apenas sua posição espacial.

Figura 8: Esquema visual da etapa 3 da modelagem da Biosfera.

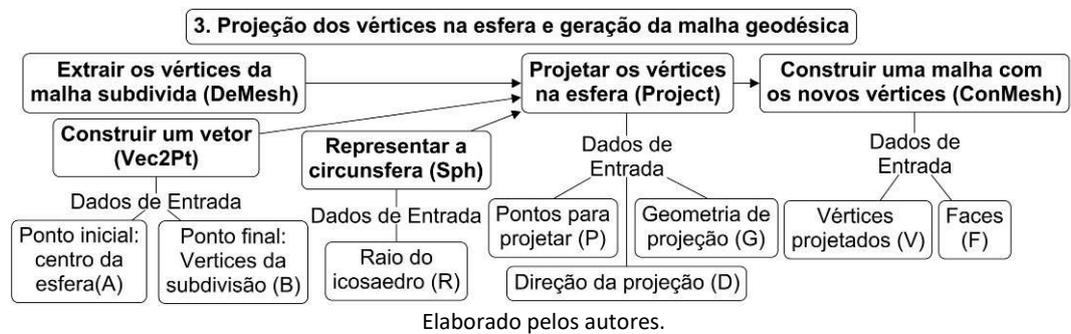
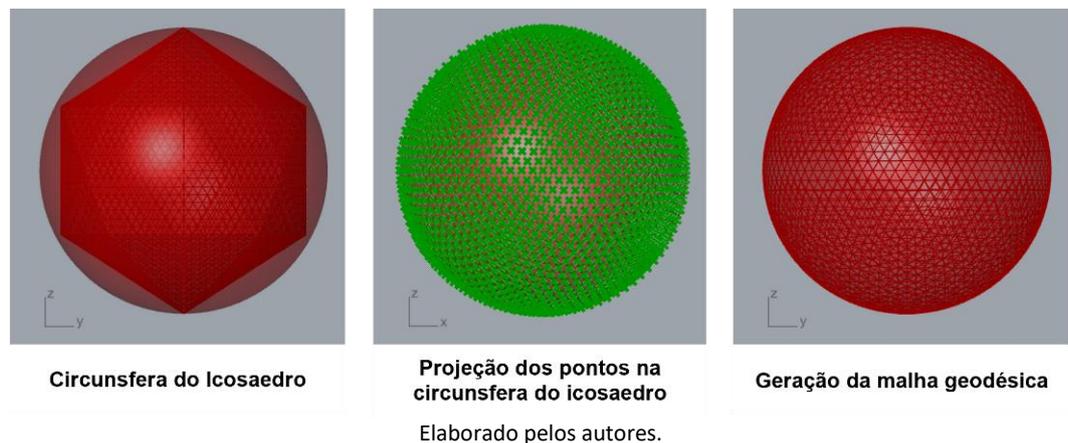


Figura 9: Representação gráfica da etapa 3 da modelagem da Biosfera



Foi estruturada a malha que define a esfera geodésica inteira, porém Fuller projetou sua Biosfera 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. Então, a Figura 10 apresenta a etapa 4 da modelagem em que se optou por definir uma seleção das faces que atinjam uma determinada altura enquanto a Figura 11 ilustra essa etapa.

Figura 10: Esquema visual da etapa 4 da modelagem da Biosfera.

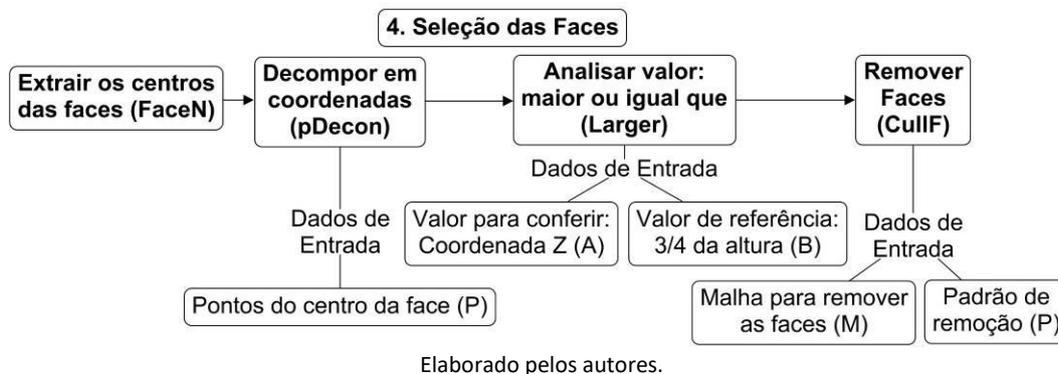
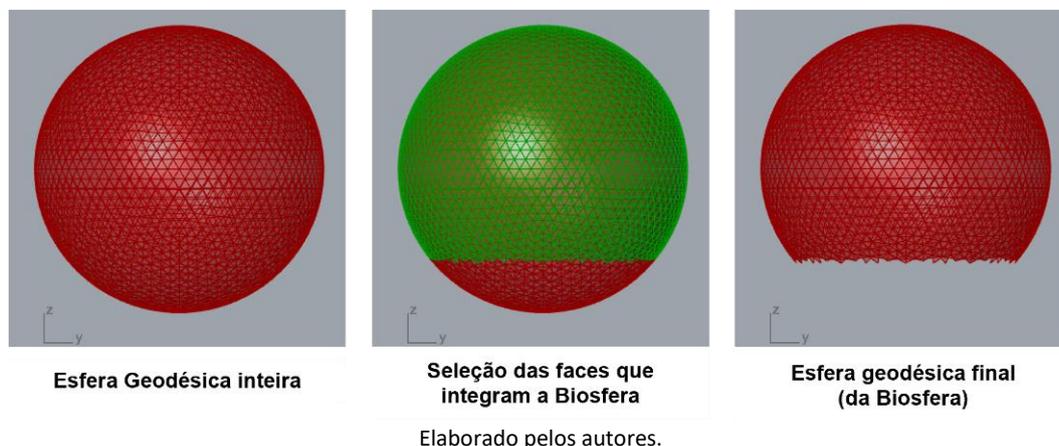


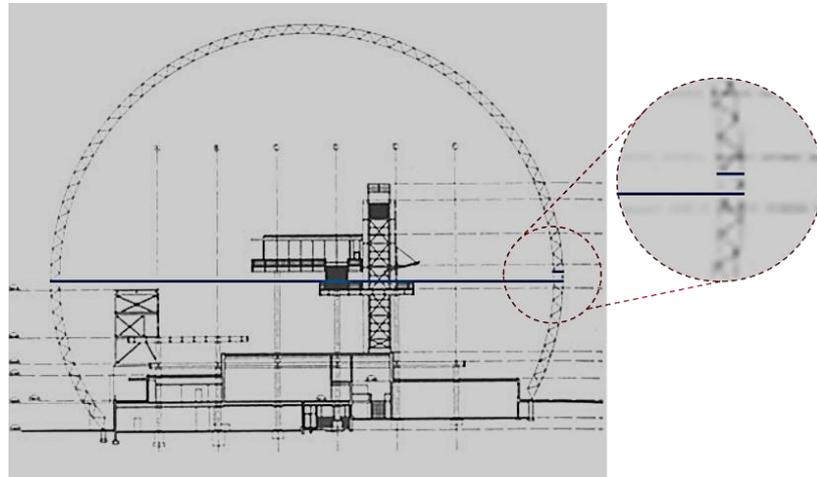
Figura 11: Representação gráfica da etapa 4 da modelagem da Biosfera.



Até este momento foi desenvolvida a modelagem da malha triangular que define a Biosfera. A existência de uma camada interna (hexagonal) não é citada em diversas referências, provavelmente para dar destaque à padronização triangular que está mais presente nos pensamentos de Fuller. Para definir a malha hexagonal, buscaram-se informações a partir de uma representação esquemática de corte do projeto (Figura 12), já que se conhece a medida do diâmetro da esfera (76m). Aplicando-se uma relação de proporcionalidade visível na imagem, é possível calcular a distância de 1,7m entre as duas malhas.

Isto significa que a malha interna está em uma esfera com raio 1,7m menor que a anterior. Seu processo de modelagem está esquematizado na Figura 13 e na imagem à esquerda da Figura 14 é apresentada a camada interna (ainda triangular) destacada em verde. A modificação das faces triangulares em hexagonais ocorre a partir do conceito de dualidade intrínseco a geometria dos sólidos platônicos: o ponto central de uma face (polígono) é o vértice da sua face (polígono) dual (imagem central da Figura 14). Essa transformação está caracterizada na etapa 5 por intermédio do componente “Dual” - disponível no plugin NGon de Vestartas e Rad (2021) - que gera os hexágonos como faces “NGon” de malhas – malhas cujas faces adotam como base polígonos com mais de 4 lados.

Figura 12: Corte esquemático da Biosfera de Montreal.



Fonte: Modificado a partir de Montreal (2016).

Figura 13: Esquema visual da etapa 5 da modelagem da Biosfera de Montreal.

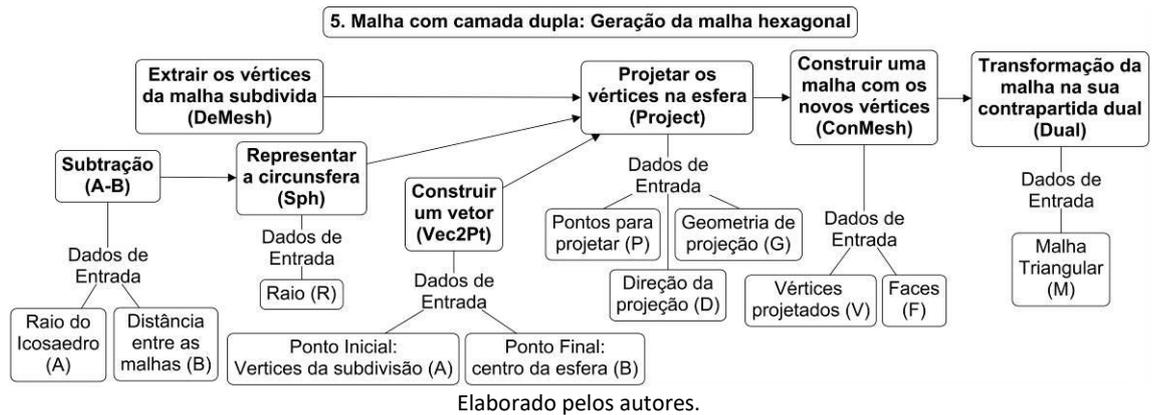
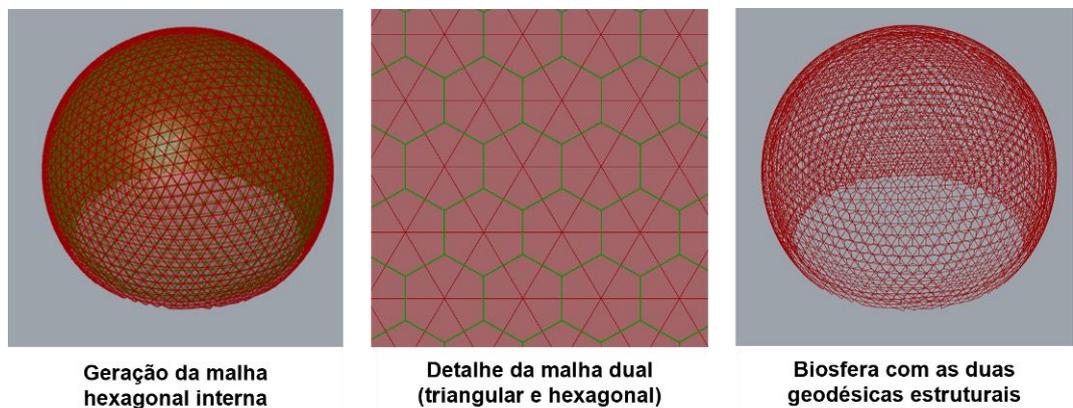


Figura 14: Representação gráfica da etapa 5 da modelagem da Biosfera



Na sequência, modela-se a conexão entre as duas malhas, com base na fotografia da

estrutura da obra, Figura 15, que ilustra a conexão entre os vértices dos hexágonos e cada um dos vértices dos seus triângulos duais.

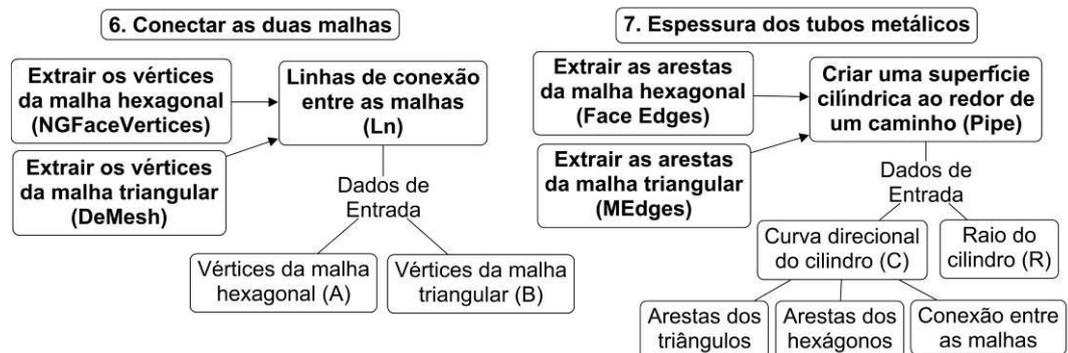
Figura 15: Detalhe de conexão entre as duas camadas de malhas.



Fonte: Brown (2006).

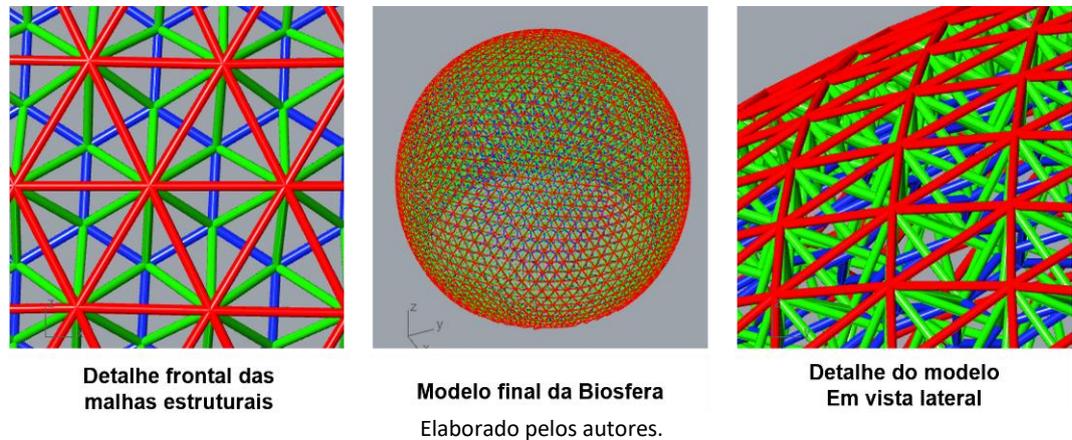
O processo de extração dos vértices de cada uma das malhas e posterior conexão entre eles caracteriza a etapa 6 da modelagem (Figura 16). E, por fim, etapa 7 apresenta o esquema que representa a visualização dessa geometria: em vermelho a malha triangular, em verde a conexão entre as malhas e em azul a malha hexagonal. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra, respectivamente, um detalhe frontal da estruturação da malha, o modelo final e um detalhe da composição da malha, ambos em perspectiva.

Figura 16: Esquema visual das etapas 6 e 7 da modelagem da Biosfera.



Elaborado pelos autores.

Figura 17: 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 sinérgica, no entanto, diversos autores consideram a geometria o seu maior legado com a obra. Apesar disso, a Biosfera ainda esconde uma estrutura de saber que nem sempre está explícita junto aos materiais que abordam os pensamentos do arquiteto. Enquanto que no primeiro momento 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, a Biosfera 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.

4. Considerações Finais

A estrutura de saber explicitada neste estudo é uma abordagem geométrica da arquitetura, a qual além de subsidiar a prática profissional da área, passa a ter um potencial didático para constituir 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.

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

Preparar os estudantes para estarem cada vez mais capacitados para as novas tecnologias exige também um avanço nos materiais didáticos que suportam o ensino, principalmente quando se tratam de saberes ainda não reconhecidos no contexto didático. A partir do uso da programação visual, com uma estrutura de saber que introduz os principais conceitos geométricos, contribui-se com a formação de novos arquitetos capacitados para a

prática profissional.

Com isso, entende-se que é possível promover uma aproximação dos estudantes ao vocabulário geométrico necessário para lidar com algumas geometrias complexas da arquitetura contemporânea e com o projeto paramétrico subjacente a estas em uma abordagem interdisciplinar para uma arquitetura com uma visão mais holística.

Referências

- BERTOL, Daniela. **Form Geometry Structure: From Nature to Design**. 1. ed. Estados Unidos: Bentley Institute Press, 2011. 232 p. ISBN 1934493112.
- 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.
- BURRY, Jane; BURRY, Mark. **The new mathematics of architecture**. Thames & Hudson. 2010
- CELANI, Gabriela; BARBOSA NETO, Wilson; FRANCO, Juarez Moara Santos. Do projeto à fabricação. Entrevista com Peter Mehrrens. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M (Organizadores). **Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão**. São Paulo: ProBooks, 2018. pp. 182-188.
- CHEVALLARD, Yves. 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.
- 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.
- GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. 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.**
- HERNANDEZ, Carlos Roberto. Parametric Gaudi. **SIGraDi 2004**, Proceedings of the 8th Iberoamerican Congress of Digital Graphics, Porto Alegre, Brasil, 2004.
- HUERTA, Santiago. Structural Design in the Work of Gaudi. **Architectural Science Review**. V. 49.4, pp. 324-339, 2006.
- JABI, Wassim; SOE, Shwe; THEOBALD, Peter; AISH, Robert; LANNON, Simon. Enhancing parametric design through non manifold topology. **Design Studies**, v. 52, 2017, pp. 96-114, ISSN 0142-694X, DOI: 10.1016/j.destud.2017.04.003
- 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.
- KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. New York: Taylor & Francis, 2005. 320 p. ISBN 0-415-27820-1.

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

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

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.

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

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.

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.

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.

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.

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, pp. 180-192, 2021.

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.

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.

PIRES, Janice de Freitas; DALLA VECCHIA, Luisa Felix; 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.

PIRES, Janice de Freitas; PEREIRA, Alice Theresinha Cybis; GONÇALVES, Alexandre. 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, pp. 27-46 2017. DOI: 10.11606/gtp.v12i3.133954

PIRES, Janice de Freitas; PEREIRA, Alice Theresinha Cybis. 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, pp. 90-110, 2019. DOI: 10.11606/gtp.v14i1.148024.

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.

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.

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, pp. 5-22, 2012.

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

ZAUK, Fernando Franz; PIRES, Janice de Freitas. Malhas poliédricas em superfícies complexas da arquitetura: uma abordagem didática ao processo de projeto paramétrico. In: **XXXVIII ENSEA e XXI CONABEA**, 2022.