REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2025, Vol. 15, No. 30
DOI 10.23972/det2025iss30pp27-42

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

Conceitos de geometria plana e simulação física integrados na conformação da estrutura do projeto Shellstar

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

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

RESUMO

Nos últimos 20 anos, uma crescente integração entre disciplinas na arquitetura tem sido evidenciada por projetos que unem concepção estrutural e formal por intermédio da geometria, uma prática essencial para o ensino de arquitetura. A geometria, aliada à representação gráfica digital e ao projeto paramétrico, desempenha um papel fundamental na maneira como concebemos e materializamos a arquitetura. A partir de uma abordagem aplicada e exploratória, fundamentada nas teorias da Transposição Didática e a Antropológica da Didática, o estudo buscou explicitar a geometria na arquitetura contemporânea em projetos estruturados por malhas. Foram selecionadas obras referenciais para a análise de suas estruturas de saber e a explicitação de seus elementos constituintes, categorizados como técnicas, tecnologias e teorias, que subsidiam a concepção e representação destes. Estes projetos foram estudados em uma sequência crescente de complexidade geométrica, destacando-se o Pavilhão Shellstar, que se conforma por meio da aplicação de forças físicas, abarcando uma estrutura de saber mais complexa daquela frequentemente abordada na formação em arquitetura. Tendo como base o discurso dos arquitetos, investigou-se a atuação das malhas no projeto e sua relação com a geometria inicial e final da obra, visando contribuir para uma compreensão mais ampla da sua aplicação na prática de arquitetura, especialmente no contexto da modelagem paramétrica. Foram identificadas diversas funções das malhas no projeto, incluindo as funções computacional e a otimização estrutural, bem como uma nova função: a otimização da forma. Além disso, os resultados revelam que a classificação encontrada inicialmente na revisão de literatura referente ao tipo de faces da malha como hexagonal não reflete completamente a complexidade do Pavilhão Shellstar, que apresenta malha com faces irregulares. Conclui-se que a compreensão profunda da geometria das malhas é essencial para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos contemporâneos, enriquecendo tanto a prática profissional quanto os currículos educacionais.

PALAVRAS-CHAVE

Geometria Complexa;
Malhas;
Forças Físicas;
Projeto Paramétrico

Flat geometry and physical simulation concepts integrated into the structure of the Shellstar project

ABSTRACT

In the last 20 years, a growing integration between disciplines in architecture has been evidenced by projects that combine structural and formal design through geometry, an essential practice for teaching architecture. Geometry, combined with digital graphic representation and parametric design, plays a fundamental role in the way we conceive and materialize architecture. From an applied and exploratory approach, based on the theories of Didactic Transposition and the Anthropology of Didactics, seeking to explain geometry in contemporary architecture in projects structured by meshes. Reference works were selected for the analysis of their knowledge structures and the explanation of their constituent elements, categorized as techniques, technologies and theories, which support their conception and representation. These projects were studied in an increasing sequence of geometric complexity, highlighting the Shellstar Pavilion, which is formed through the application of physical forces, encompassing a more complex structure of knowledge than that frequently addressed in architecture training. Based on the architects' discourse, we investigated the role of meshes in the project and their relationship to the initial and final geometry of the work, aiming to contribute to a broader understanding of their application in architectural practice, especially in the context of parametric modeling. Several functions of meshes in design were identified, including computational functions and structural optimization, as well as a new function: shape optimization. Furthermore, the results reveal that the classification initially found in the literature review regarding the type of mesh faces as hexagonal does not completely reflect the complexity of the Shellstar Pavilion, which presents a mesh with irregular faces. It is concluded that a deep understanding of mesh geometry is essential for the development of contemporary architectural projects, enriching both professional practice and educational curricula.

KEYWORDS

Complex Geometry;
Meshes;
Physical Forces;
Parametric Design

CONTATO: Fernando F. Zauk – *ferzauk@gmail.com*

© 2025 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos 20 anos, tem-se observado uma recorrência de soluções de projeto que promovem uma maior integração entre as diversas disciplinas que compõem o campo da arquitetura. Esta tendência é exemplificada por projetos que estabelecem diálogos entre a concepção estrutural e a formal, explorando-as pelo viés da geometria. Vale ressaltar que essa prática não é nova, sendo proposta por arquitetos do século XX, como Antoni Gaudí e Freio Otto.

Para o ensino de arquitetura, torna-se fundamental não somente resgatar tais práticas, mas também avançar no desenvolvimento de um pensamento crítico e consciente dos estudantes, frente aos desafios contemporâneos da profissão, que exigem cada vez mais projetos sustentáveis. Estes podem ser motivados a partir de uma aprendizagem contextualizada em que a concepção formal priorize o desempenho da forma. O desempenho estrutural, por exemplo, pode estar associado a alguns tipos de geometrias que são estudadas na formação em arquitetura, tais como a classe de superfícies curvas abordada em Rodrigues (1960). Com a função de otimizar mais ainda tal tipo de desempenho, superfícies mais complexas, como são as superfícies mínimas (CARMO, 1987), foram empregadas em alguns exemplares do passado por meio de estudos analíticos e experimentais (BURRY; BURRY, 2010), que na arquitetura contemporânea são efetivados a partir das técnicas digitais de representação e simulação.

Nesse contexto, o ensino da geometria, mesmo que ainda em estágios iniciais de formação, aliado a representação gráfica digital, pode desempenhar um papel fundamental na cognição dos estudantes, promovendo o desenvolvimento da percepção espacial ao correlacionar os conceitos geométricos com situações concretas de arquitetura (LEOPOLD, 2003). Em um contexto digital, a geometria ainda tem um papel fundamental, pois a base da representação arquitetônica, para dar forma a um projeto, é definida a partir de processos gráficos projetivos. O desenho digital associado ao projeto de arquitetura nada mais é do que a continuidade e evolução desse processo, só que agora em sua sequência evolutiva: o suporte do computador e do meio virtual (LACOMBE, 2006).

Para Woodburry (2010), a transição do analógico ao digital apenas emulou as ações já conhecidas dos arquitetos, replicando-as tal como aconteciam antigamente. No entanto, para o mesmo autor a partir do advento do desenho paramétrico passou a existir uma mudança significativa no modo de utilização das tecnologias digitais, direcionando também o pensamento do projeto. Este tipo de processo de projeto é baseado no pensamento algorítmico, pois promove a definição formal dos elementos e codifica suas relações por intermédio de um sistema de expressões (JABI *et al.*, 2017). Um projeto construído num sistema paramétrico possui cada uma de suas partes delimitadas, estabelecendo uma definição da geometria de cada elemento do design - mesmo que implicitamente – e valorizando a sequência de desenvolvimento do projeto, suas relações e lógicas internas.

De acordo com Jabi et al. (2017), o interesse na representação final do modelo cede espaço para a associação interna e entre elementos da geometria, bem como as soluções relacionadas aos requisitos projetuais. Assim, esta abordagem transformou o interesse da modelagem, saindo da geometria final para destacar o desenvolvimento da própria geometria no processo de geração da forma.

Apesar dos avanços no contexto científico e profissional, o ensino do projeto paramétrico e da representação gráfica digital com viés na geometria ainda é limitado nas escolas de arquitetura brasileiras, o que representa um desafio para a formação dos futuros profissionais.

Assim, faz-se necessário abordar uma alternativa de inserção desse conteúdo junto aos estudantes de arquitetura. Considerando que a lógica paramétrica está atrelada as relações internas de um modelo geométrico, é crucial que a metodologia de ensino priorize a compreensão dos princípios geométricos que fundamentam essas relações, em vez de focar apenas na aprendizagem de software. Para superar essa lacuna, Pires, Pereira e Gonçalves (2017) apontam a necessidade de introduzir gradualmente o vocabulário geométrico, possibilitando uma compreensão mais abrangente e aplicada das técnicas digitais. A abordagem educacional deve priorizar não apenas a utilização das tecnologias digitais, mas também a compreensão integral dos elementos envolvidos no processo de projeto digital.

Segundo estas autoras, ao compreender as geometrias integradas ao projeto arquitetônico, os profissionais podem se aproximar dos métodos contemporâneos de design, em que o projeto paramétrico desempenha um papel cada vez mais relevante. Uma educação arquitetônica mais abrangente e integrada, que inclua o ensino do projeto paramétrico desde estágios iniciais, pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de profissionais capazes de enfrentar os desafios contemporâneos da arquitetura, como a busca por formas inovadoras, a sustentabilidade e a eficiência.

Entre os anos 2021-2023 foi realizada uma pesquisa de mestrado pelo autor deste artigo em que o estudo da geometria associada à representação gráfica digital foi direcionado ao emprego de malhas na arquitetura (Zauk, 2023). Foram estudadas as suas propriedades e aplicações a partir de quatro projetos referenciais, sejam eles: a Biosfera de Montreal; o Projeto Éden; O Water Cube; e a Shellstar. O estudo teve uma abordagem didática, fundamentada na teoria da transposição didática e na teoria antropológica da didática, ambas de Chevallard (1991; 1999), pesquisador atuante na didática da matemática. Por esta teoria, é possível identificar a estrutura de um saber e selecionar quais elementos integrantes do saber irão transitar em dado contexto, sejam o científico, o profissional e o didático. Para este autor, no contexto de ensino, é importante considerar o saber em sua estrutura integral, explicitando as técnicas (o saber-fazer), as tecnologias (discursos que explicam e justificam as técnicas) e as teorias (elementos que tem o mesmo papel em relação a tecnologia), para a resolução de um problema ou uma classe de problemas.

Neste trabalho, será apresentado o estudo da Shellstar, no qual existe uma interação entre conhecimentos de geometria plana e espacial, da representação gráfica digital e das técnicas digitais de simulação por meio do desenho paramétrico. A escolha deste projeto se deu no contexto de uma disciplina de pós-graduação cursada no segundo semestre de 2020, que abordou o estudo de geometrias complexas e da modelagem paramétrica destas a partir de referenciais de arquitetura. A proposta de tal disciplina visava o estudo de um projeto configurado com superfície mínima atuante em compressão e tendo princípios de estabilidade estrutural que poderiam ser representadas a partir de modelos de curvas e superfícies ou a partir da simulação de deformações por esforços atuantes.

A análise inicial do projeto Shellstar foi o ponto de partida para o desenvolvimento da pesquisa de mestrado, que buscou identificar e explicitar as geometrias implícitas em obras contemporâneas de arquitetura que se utilizaram de malhas junto ao processo de projeto e de modelagem paramétrica. Então, cronologicamente foi o primeiro projeto analisado. Porém, esta obra se diferencia dos demais projetos analisados por utilizar a técnica de aplicação de forças físicas em sua geração, caracterizando-se por estar associado a uma estrutura de saber mais complexa para a arquitetura, uma vez que envolve a área da física e modelos de simulação digital. Dessa

maneira, considera-se a relevância do estudo desta obra para o ensino de geometria e representação na arquitetura e a necessidade de explicitar os elementos que integram sua estrutura de saber.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Em Zauk e Pires (2023) tem-se uma revisão de literatura que estabelece as bases conceituais e teóricas para o desenvolvimento do estudo.

Em tal revisão, foram identificadas as funções e aplicações das malhas na conformação de geometrias complexas e na modelagem digital. Tais aplicações fundamentaram as análises dos projetos de referência e são retomadas no artigo para destacar a importância do projeto Shellstar como objeto de estudo no contexto da arquitetura contemporânea. Os tópicos a seguir resumem os resultados desta revisão de literatura.

2.1 Aplicação de Malhas na Geometria Complexa da Arquitetura

A compreensão teórica da aplicação de malhas na arquitetura é fundamental para a sistematização dos atributos arquitetônicos presentes em exemplos de formas complexas. Ao analisar as diferentes abordagens teóricas, é possível perceber a importância da topologia das malhas na representação de superfícies de forma livre. De acordo com Pottmann et al. (2007) e Luo (2014), uma malha consiste em uma coleção de pontos organizados em elementos básicos chamados faces, delimitadas por polígonos ou triângulos. Enquanto Pottmann et al. (2007) enfatizam a especificação dos vértices e a forma como se unem para formar as arestas e as faces, Luo (2014) destaca a importância da conectividade entre as faces por meio das arestas.

A topologia das malhas, como ressaltado por Pottmann et al. (2007), refere-se à continuidade da superfície e à manutenção das relações entre seus elementos, independentemente das deformações que possam ocorrer. Isso demonstra que a configuração geométrica das malhas é essencial para a representação das formas arquitetônicas complexas. Aquelas formadas por polígonos regulares como triângulos, quadrados e hexágonos, são capazes de preencher integralmente o espaço sem vazios (POTTMANN ET AL; 2007; LIMA, 2021), proporcionando uma estrutura geométrica estável e regular. Por outro lado, as malhas irregulares, baseadas em diagramas de Voronoi ou triangulações de Delaunay, oferecem uma abordagem mais orgânica e adaptável, inspirada em padrões encontrados na natureza.

Na prática projetual, temos exemplos reconhecidos, como a contribuição de Antoni Gaudí que vai além de suas obras icônicas, sendo também um pioneiro na aplicação de modelos em malhas e métodos paramétricos no processo de projeto. Seu profundo conhecimento matemático e domínio da geometria permitiram-lhe explorar formas complexas de maneira inovadora. Um exemplo disso é sua compreensão da catenária invertida, que ele utilizou para criar estruturas em compressão pura, como as encontradas na Sagrada Família (HUERTA, 2006; BURRY; BURRY, 2010). Para esse projeto, Gaudí construiu modelos físicos da catedral usando malhas estruturadas por uma rede de cordas suspensas. Ele manipulava esses modelos, controlando os parâmetros da geometria por meio de pesos variados pendurados na estrutura, buscando novas configurações que mantivessem as propriedades estruturais desejadas.

Outro arquiteto conhecido por sua abordagem de modelagem em malhas é Frei Otto, que também explorou o uso de forças físicas para deformar malhas em seus modelos físicos. Inspirado na conformação geométrica das bolhas de sabão, Otto utilizava maquetes em diferentes escalas para calcular esforços e dimensões dos elementos estruturais (LIDDELL, 2015).

2.2 Aplicações das Malhas na Modelagem Digital Arquitetônica

A compreensão das malhas em meio digital como elementos da modelagem paramétrica é essencial para arquitetura contemporânea, permitindo a criação de formas complexas e inovadoras que atendam às demandas estéticas e funcionais dos projetos arquitetônicos. A Tabela 1 ilustra uma classificação inicial sob o aspecto da geometria das faces, e que foi apresentada em Zauk e Pires (2023).

Tabela 1 Classificação das malhas quanto à geometria das faces.

Geometria das Faces	Classificação	Exemplo/Definição
	Regular	Triângulo
		Quadrado
		Hexágono
	Semi-regular	Combinação de polígonos
	Irregular	Diagrama de Voronoi
		Triangulação de Delauney

Fonte: elaboração própria.

As malhas permitem a conversão de geometrias complexas em formas elementares, como polígonos triangulares, facilitando o processamento computacional (POTTMANN ET AL., 2007). Além disso, por sua composição de faces, arestas e vértices, fundamenta-se na disposição desses elementos de maneira a estabelecer um sistema organizacional para a geometria digital (FLEISCHMANN; AHLQUIST, 2009).

A modelagem iniciada com uma superfície contínua e subsequente transformação em uma malha é denominada tesselação (LIMA, 2021). Nesse contexto, as malhas podem ser reestruturadas e reorganizadas para alcançar novas configurações de elementos, seja para otimização visual das formas arquitetônicas (PAN ET AL., 2016) ou para otimização estrutural (FLEISCHMANN; AHLQUIST, 2009). Por fim, também é possível identificar o uso das malhas como solução na geração de formas arquitetônicas resultantes da aplicação de forças físicas, com técnicas de cálculo e simulação para a busca de formas complexas otimizadas.

As malhas geométricas desempenham um papel significativo na arquitetura contemporânea, permitindo a criação de formas complexas e a análise estrutural detalhada. Sua aplicação, conforme a Figura 1, abrange desde o processo analógico de modelagem física até a modelagem digital avançada, representando uma evolução significativa na prática arquitetônica.

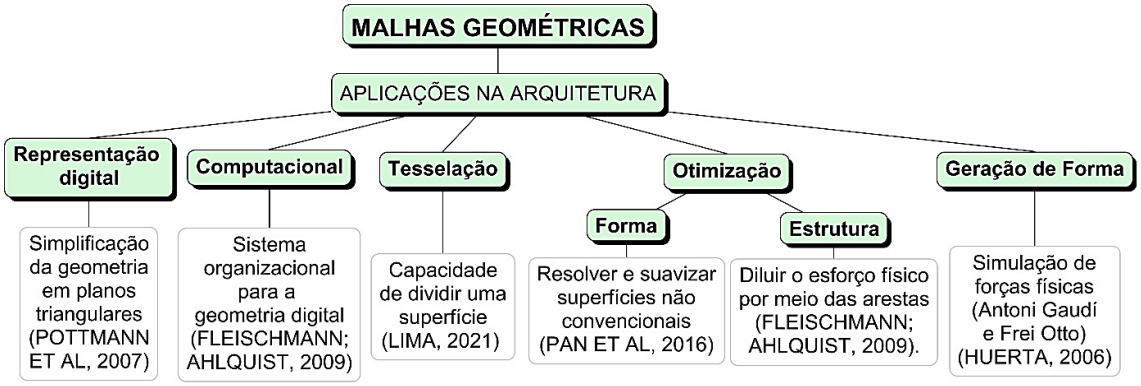


Figura 1 Tipos de aplicações das malhas na arquitetura. Fonte: Zauk e Pires (2023).

2.3 Análise Prévia da Shellstar

O projeto do pavilhão Shellstar foi inicialmente caracterizado quanto a geometria das faces de sua malha. Mathys (2018) especifica que as faces da malha do pavilhão Shellstar são elementos predominantemente hexagonais. O autor considera ainda a presença de um único pentágono no centro da malha hexagonal.

A cerca da identificação das funções das malhas em projetos contemporâneos, tem-se algumas observações previamente identificadas sobre esta obra. Em relação a sua função computacional, a malha é utilizada como um sistema de organização, ou seja, assume a função de sistematizar – numerar e identificar - seus elementos. Nesse sentido, sua malha é constituída 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 está presente quando o projeto apresenta o intuito de aproximar sua forma de uma superfície curva. Essa função foi empregada na Shellstar a partir da técnica de refinamento da malha, aumentando a quantidade de faces (MATSYS, 2018; LANGDON, 2018). Segundo Mathys (2018), a otimização da malha desempenha um papel fundamental na resolução de questões estruturais do projeto, abordando processos de otimização de esforços da estrutura por meio da malha no ambiente digital.

Quanto à geração da forma, observa-se uma recorrência de técnicas que simulam a atuação de forças físicas. Além do processo ser inspirado na abordagem de Antoni Gaudí, que utilizou a força da gravidade para a formação da estrutura, se apresenta como sua contrapartida digital (MATSYS, 2018). A aplicação da força da gravidade resulta na conformação da malha e na definição da forma final.

Essa revisão inicial permitiu identificar que a obra selecionada apresenta diferentes aplicações para a malha. Isso representa uma primeira abordagem, 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 a obra passa a ser detalhadamente explicitada.

3. METODOLOGIA

O estudo se situa na abordagem da Teoria da Transposição Didática e, com base na Teoria Antropológica da Didática, segue o princípio da explicitação e estruturação de um saber, considerando seus elementos constituintes para assim configurar uma estrutura integral.

Para atingir estes princípios, inicialmente foi realizada uma revisão de literatura sobre malhas na arquitetura, reconhecendo-se suas características junto à geometria. Nessa etapa, destacaram-se as pesquisas em matemática de Pottmann et al. (2007), por aproximar a área da geometria com a prática arquitetônica. E, recorre-se a autores como Luo (2014) e Lima (2021) para relacionar as diversas abordagens e compreender sobre as malhas, suas diferentes finalidades e critérios para a aplicação.

A partir de este reconhecimento, buscou-se selecionar previamente obras de arquitetura para compor o escopo da pesquisa. Isto porque o estudo visa abordar os conceitos geométricos em casos específicos, para demonstrar a relação entre o ensino e a prática profissional de maneira construtiva. Para isso, serão analisados os projetos identificados na etapa de revisão. Desse modo, identificou-se ao longo da etapa de análise das obras que Shellstar, Biosfera, Projeto Éden e Water Cube possuem uma interrelação entre suas estruturas de saber. A partir de este reconhecimento, optou-se por limitar o corpo de análise a estes 4 projetos e iniciar as análises a partir da obra com menor complexidade em sua geometria, avançando em níveis crescentes para garantir uma sequência gradual em que o saber explicitado possa subsidiar as novas estruturas que integram as obras mais complexas, assim como aponta Chevallard (1999) em sua teoria da didática.

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

O quarto projeto de referência, o Pavilhão Shellstar, já havia sido estudado pelo autor deste estudo no contexto de uma disciplina de pós graduação, cursada no ano de 2020. No entanto, após as análises dos três projetos citados, houve a necessidade de revisar e reformular o estudo anterior, em vista de se ter identificado relações com as estruturas de saber de tais projetos. Nesse trabalho é apresentado o estudo que levou a compreender a estrutura de saber do projeto Shellstar, a partir do referencial de Chevallard (1999), que considera o

saber como um objeto dinâmico e passível de transformações conforme o contexto de sua aplicação.

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

4. A ESTRUTURA DE SABER DE REFERÊNCIA DO PAVILHÃO SHELLSTAR

O pavilhão Shellstar, ilustrado na Figura 2, representa uma estrutura arquitetônica efêmera concebida como ponto de encontro para o festival de arte e design Detour em 2012, em Wan Chai, Hong Kong. Seu projeto se baseou no uso de avançadas tecnologias digitais de modelagem, simulação e fabricação, visando à criação de uma estrutura inovadora, dinâmica e icônica para o período de duas semanas do evento (MEAN, 2023c).



Figura 2 Vistas noturna (aérea e perspectiva externa) do pavilhão Shellstar.

Situado em um terreno baldio no distrito de Wan Chai, o projeto foi concebido com a intenção de incentivar os visitantes a se deslocarem em direção ao centro do pavilhão durante os intervalos do evento e, em seguida, retornarem ao festival. A Figura 3 ilustra um recorte do mapa da região, com o terreno destacado em vermelho, evidenciando sua proximidade com o local do evento, em azul.



Figura 3 Planta esquemática de localização, destacando o local do evento (azul) e o terreno que recebeu o Pavilhão Shellstar (vermelho). Fonte: Modificado a partir de Matsys (c2022).

O conceito é de autoria do arquiteto Andrew Kudless, do escritório Matsys, em colaboração com Riyad Joucka, da Universidade de Hong Kong (MATSYS, c2022). O objetivo da proposta era otimizar o desempenho espacial ao mesmo tempo em que minimizava a estrutura e a quantidade de material utilizado. Para isso, os arquitetos utilizam-se de um modelo geométrico e sua otimização por simulação de forças físicas em ambiente de modelagem paramétrica, permitindo o desenvolvimento, fabricação e montagem do projeto em um prazo de seis semanas.

O pavilhão é resultado de um sistema emergente que integra forma, material e performance em um único processo (MEAN, 2023c). De acordo com Andrew Kudless, o processo de design foi divido em três etapas distintas: a geração de formas, a otimização da superfície e o planejamento da fabricação (MATSYS, c2022). Para realizar essas etapas foram utilizadas várias tecnologias, incluindo o software Rhinoceros e seu plugin Grasshopper, o plugin Kangaroo para simulação de forças físicas, o plugin LunchBox e programação em Rhinoscript e Python.

Nesse estudo será abordada a primeira etapa do processo, que se concentra na busca da forma, através da exploração e explicitação dos conceitos de geometria integrados ao desenho paramétrico. A configuração do pavilhão surge de um processo baseado nas técnicas clássicas de modelagem física que foram desenvolvidas por Antoni Gaudí para a obtenção de superfícies otimizadas. Matsys se apropriou dessas técnicas paramétricas e as replicou em modelagem digital para definir a forma do projeto. A **Figura 4** apresenta um esquema que ilustra o processo de configuração original do Pavilhão Shellstar.

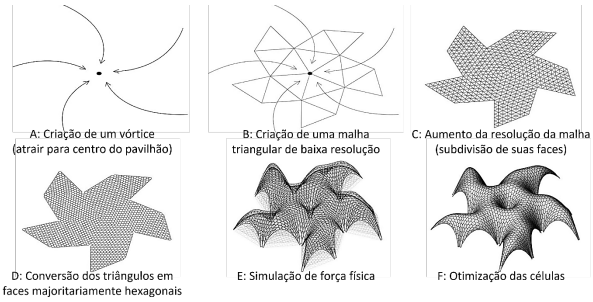


Figura 4 Diagrama esquemático do processo de projeto de desenvolvimento do Pavilhão Shellstar. Fonte: Modificado a partir de Matsys (c2022).

O projeto teve, como ponto de partida, a ideia de criar um vórtice espacial (Figura 4A) que pudesse atrair os visitantes em direção ao centro do pavilhão (MATSYS, c2022). A partir disso, sua geometria foi inspirada em estruturas naturais, inicialmente na orquídea de cinco pétalas, um símbolo icônico presente na bandeira de Hong Kong (MEAN, 2023c), como pode ser observado na Figura 5. Nesse sentido, a referência da flor não configura a forma tridimensional do pavilhão, mas a sua projeção no plano (Figura 4B). Assumindo, assim, a geometria do que os responsáveis chamam de uma "estrela" de cinco pontas.



Figura 5 Fotografia em detalhe da flor da orquídea de Hong Kong e fotografia da bandeira dessa cidade. Fonte: Mercadante (2010) e Ancheta-Adrias (2008).

Para estabelecer o perímetro da projeção dessa flor, Matsys (c2022) define a relação entre os pontos dessa geometria no plano horizontal, conforme o esquema gráfico, em perspectiva, que está disponível no site do escritório. O esquema dessa geometria foi refeito em projeção paralela ortogonal (Figura 6A) para que fosse possível desenvolver uma análise geométrica, visando caracterizar os tipos de polígonos obtidos com a interligação dos pontos. Inicialmente, distinguiram-se as diferentes arestas que compõem o módulo, ilustrado na Figura 6B. Depois, buscou-se a conformação dos triângulos a partir dessas arestas, identificando a presença de dois triângulos isósceles e um equilátero no módulo, que se repetem em simetria de rotação ao redor do ponto central do pentágono, formando a figura da estrela (Figura 6C).

Ao centro existe um arranjo de cinco triângulos isósceles, rotados no ponto central da estrela, os quais formam um

pentágono. Contíguos aos lados do pentágono estão dispostos mais cinco triângulos isósceles (espelhados em relação aos cinco primeiros) e que também estão em um arranjo por simetria de rotação em relação ao ponto central. Os triângulos mais externos, na cor vermelha, são equiláteros.

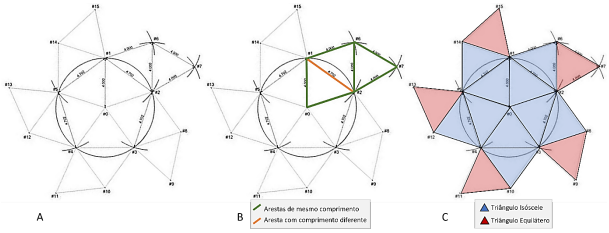


Figura 6 Processo de análise da geometria base (estrela de cinco pontas) do Pavilhão Shellstar a partir do esquema gráfico dos pontos iniciais. Fonte: Modificado a partir de Matsys (c2022).

Essa projeção da flor no plano horizontal (Figura 7A), dividida em triângulos maiores, é configurada como uma malha, em um processo chamado de tesselação (Figura 7B). Cada triângulo inicial será abordado como uma face da malha. Em seguida, essa malha é subdividida para aumentar sua resolução (MATSYS, c2022). Ou seja, suas faces são divididas em diversos triângulos menores, aumentando o número de elementos da malha (Figura 7C).

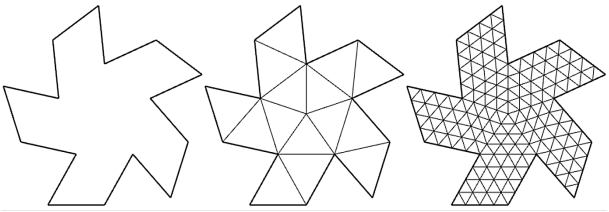


Figura 7 Processo de tesselação e subdivisão da malha inicial do Pavilhão Shellstar. Fonte: Elaboração própria a partir de Matsys (c2022).

Depois, ocorre o processo de transformação das faces triangulares da malha em seus polígonos duais. As faces inicialmente triangulares são convertidas em elementos hexagonais. A Figura 8 apresenta a projeção da estrela com os padrões triangulares (Figura 8A), a sobreposição dos dois padrões (Figura 8B) e o padrão hexagonal (Figura 8C). Faz-se necessário destacar que, de acordo com os responsáveis pelo projeto, essa configuração é considerada majoritariamente hexagonal, ou seja, não é totalmente hexagonal, pois o elemento central da estrela (a face no centro da superfície, destacada em vermelho na Figura 8C) é um pentágono.

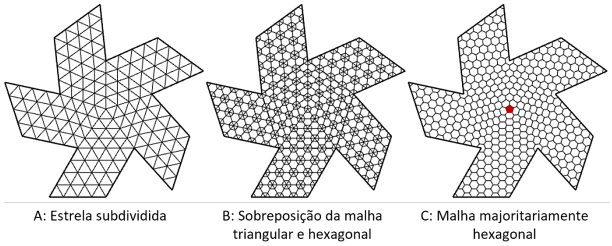


Figura 8 Processo de transformação das faces triangulares da malha inicial em polígonos hexagonais. Fonte: Elaboração própria a partir de Matsys (c2022).

A próxima etapa do processo se baseia em estruturas puramente em compressão, abordadas por arquitetos e engenheiros renomados, como Antônio Guadí, Frei Otto e Felix Candela (MATSYS, c2022). O objetivo é permitir que o pavilhão Shellstar seja construído com uma quantidade mínima de material, em uma camada fina, e cobrindo uma grande área (MEAN, 2023c).

Este processo é semelhante ao realizado com curvas catenárias para obter arcos em pura compressão, em que tais curvas ficam submetidas à deformação da gravidade até alcançar um equilíbrio estável (a partir da tensão), sendo após invertidas para a definição da curvatura dos arcos em compressão (HUERTA, 2006). Na modelagem digital do projeto foi utilizado o plugin Grasshopper e seu componente de forças físicas, o Kangaroo, para configurar uma forma alinhada com os vetores estruturais (MATSYS, c2022).

Na Figura 9, está ilustrado o processo. A malha hexagonal ainda no plano horizontal (A), a aplicação/simulação das forças físicas (B) e a estrutura em compressão (C).

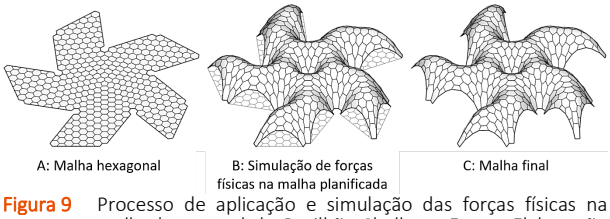


Figura 9 Processo de aplicação e simulação das forças físicas na malha hexagonal do Pavilhão Shellstar. Fonte: Elaboração própria a partir de Matsys (c2022).

A forma do pavilhão é curvilínea e fluida, composta por uma série de arcos entrelaçados que se unem para criar uma cúpula com formato de concha (Figura 9C). Essa geometria retoma a referência em estruturas encontradas na natureza, as conchas marinhas, que são uma fonte adicional de inspiração para o projeto devido à sua relação com o porto próximo ao local do pavilhão (MEAN, 2023c).

Os arquitetos, após conceberem a estrutura em forma de concha para o pavilhão, seguiram com os processos de otimização da forma. Para tal, realizaram análises de desempenho da estrutura, verificando o momento fletor (Figura 10A), a deflexão (Figura 10B) e o estresse do plano (Figura 10C). Com base nesta análise, reconstruíram e modificaram a malha da estrutura até alcançarem um resultado de desempenho satisfatório (MATSYS, c2022).

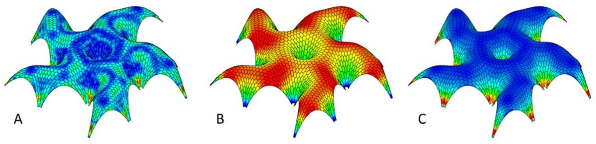


Figura 10 Análise estrutural do pavilhão Shellstar para momento fletor (A), deflexão (B) e estresse do plano (C). Fonte: Matsys (c2022).

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

Além da otimização das células para torná-las mais planas, outra estratégia adotada no projeto foi a incorporação de perfurações nas células. De acordo com Matsys (c2022), essa abordagem foi implementada para otimizar a iluminação do espaço. Por questões estruturais, para as células localizadas em níveis mais baixos da estrutura foi removido menos material de cada unidade, resultando em perfurações menores. Por outro

lado, à medida que as peças se elevam na estrutura, as perfurações são aumentadas, proporcionando maior passagem de luz e contribuindo para uma distribuição adequada da iluminação natural no interior do pavilhão.

As células foram projetadas em Coroplast, uma fibra de vidro translúcida que permite a entrada da luz natural no interior da estrutura. Foi necessário o alinhamento das peças com os sulcos do material, um processo que também foi automatizado por meio de scripts.

4.1 Estudo Exploratório Sobre a Geometria da Shellstar

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

Assim, buscou-se apoio nas contribuições de outros pesquisadores que se dedicaram a representação digital da Shellstar, tal como Singla (2019) e Raghu (2019), que deram prioridade a investigar o processo de geração por simulação de forças físicas em detrimento da representação fiel da própria forma. Nesta abordagem, a proposta de modelagem atua como um reconhecimento de um processo de obtenção da geometria tridimensional e, mais do que isso, uma primeira abordagem às forças físicas. Na Figura 11, está ilustrado um esquema estrutural desenvolvido por Raghu (2019) referente ao Pavilhão Shellstar, cuja forma base da estrela (no plano) tem seis pontas em vez de cinco.

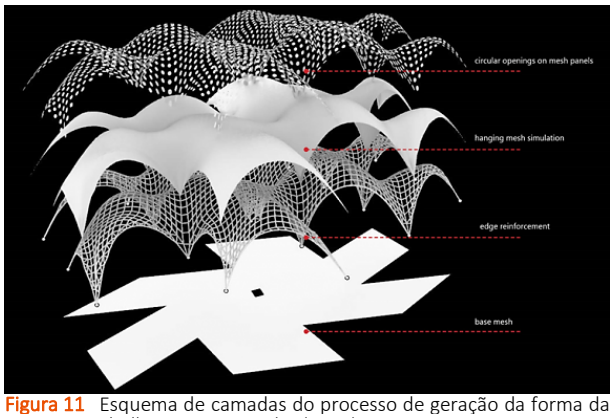


Figura 11 Esquema de camadas do processo de geração da forma da Shellstar. Fonte: Raghu (2019).

Embora haja alteração no número de pontas da estrela, o processo de configuração da geometria tridimensional seguiu sendo o mesmo da forma original do projeto. Na Figura 12, está o comparativo das duas estrelas, a primeira com a malha triangular e a figura de um pentágono no centro da malha (A), a segunda com a figura de um hexágono (B).

Inicialmente, a malha hexagonal regular não poderia ser resolvida na configuração de uma estrela de cinco pontas devido à incompatibilidade na estrutura interna da malha (polígonos que definem as faces). Em outras palavras, o pentágono central encaixaria no padrão regular hexagonal somente quando os hexágonos apresentam deformações, o que tornaria complexa sua representação. No entanto, Singla (2019) e Raghu (2019) superaram essa limitação adotando um hexágono como polígono central. A partir desta modificação, foi possível representar a malha e avançar na geometria e processo de projeto da Shellstar.

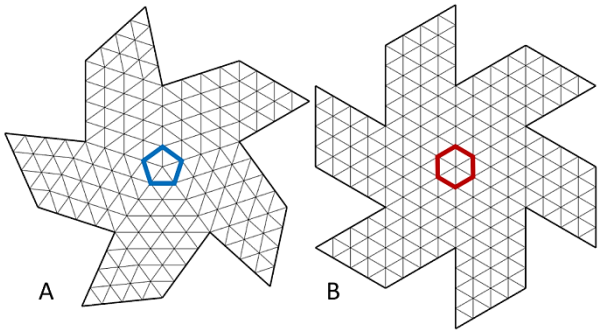


Figura 12 Comparativo entre as estrelas de cinco e seis pontas, com suas figuras centrais destacadas: em azul o pentágono e em vermelho o hexágono. Fonte: Elaboração própria.

Depois da solução para a padronização das faces da malha, sistematizou-se uma primeira estrutura de saber que explicita a obra em seus aspectos geométricos (Figura 13). No eixo vertical são elencadas as transformações geométricas e construtivas da forma, enquanto que no sentido horizontal são apresentadas as especificidades de cada conceito adotado na geração de tal forma, acompanhadas de descrições e justificativas de suas aplicações na arquitetura. Essa representação visual permite uma compreensão clara das diferentes etapas do processo e das decisões tomadas em cada uma delas, proporcionando uma visão abrangente do desenvolvimento da forma do projeto.

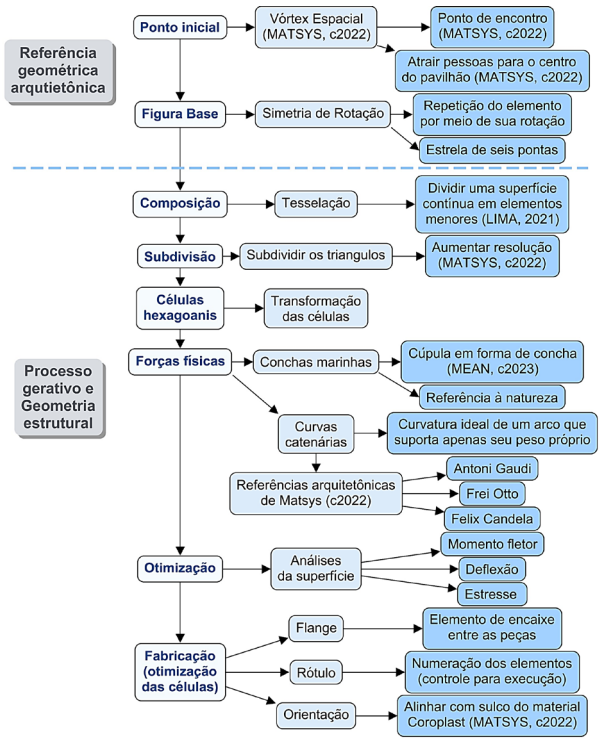


Figura 13 Esquema inicial do Pavilhão Shellstar. Fonte: Elaboração própria.

Até então, o saber referente à geometria da obra está baseado em definições e explicações teóricas, oriundas do discurso dos responsáveis técnicos e do processo de modelagem desenvolvido em Singla (2019) e Raghu (2019). Para complementar essa estrutura de saber, amplia-se a pesquisa com a exploração das técnicas de geração associadas às tecnologias de representação digital, propondo-se a modelagem paramétrica conceitual do Pavilhão Shellstar. Para tanto, procurou-se estruturar um esquema (Figura 14) que representasse a síntese do algoritmo (aqui entendido como as etapas do processo de representação) utilizado no desenvolvimento do projeto.

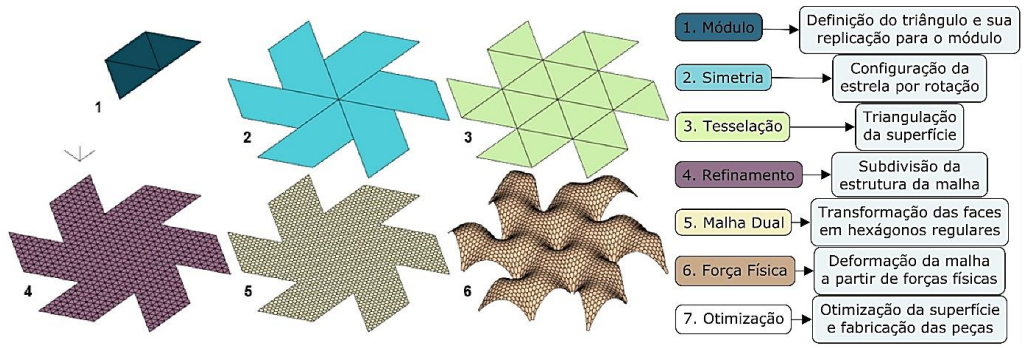


Figura 14 Esquema síntese do algoritmo inicial e suas etapas para a geração da forma da Shellstar. Fonte: Elaboração própria.

Com isso, são estabelecidas as etapas que caracterizam o processo de projeto da Shellstar, como segue:

1) definição do módulo composto por um conjunto de triângulos;
2) a configuração da estrela de seis pontas a partir da aplicação de simetria de rotação;
3) a tesselação da superfície, ou seja, transformação da superfície em malha;

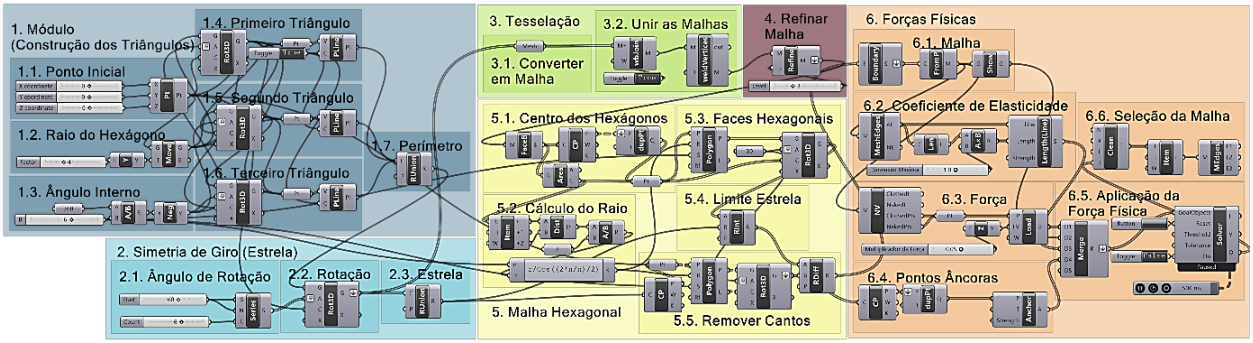


Figura 15 Programação visual referente ao primeiro modelo do projeto do Pavilhão Shellstar .Fonte: Elaboração própria.

4) o processo de refinamento, em que cada uma das faces triangulares é subdividida para aumentar a resolução e precisão;
5) a transformação da malha resultante em sua malha dual;
6) aplicação de forças físicas como principal processo de geração da forma, utilizando técnicas disponíveis no plugin Kangaroo para simular o comportamento estrutural e a deformação sob essas forças visando buscar a forma final do projeto;
7) e os processos de otimização, tanto da superfície como das células individuais, com o objetivo de prepará-las para fabricação e garantir eficiência e qualidade no resultado final, embora essa última etapa não seja desenvolvida nesta pesquisa.

Seguindo estas etapas, o processo de modelagem é especificado por meio da programação visual, conforme apresentado na Figura 15.

As partes detalhadas dessas etapas que representam o processo de modelagem paramétrica da geometria do Pavilhão Shellstar são observadas na Figura 16.

Na etapa 1, é representado o módulo inicial do projeto. Esse procedimento consiste na definição da posição dos pontos iniciais do projeto (A), seguido pela conexão desses elementos por linhas para formar os triângulos base (B) e, posteriormente, na delimitação do contorno desse conjunto como o módulo inicial do projeto (C).

Na etapa 2, é estabelecida a simetria de rotação em torno de um ponto central. O módulo é então replicado através de rotação em série (D), totalizando 6 módulos e definindo a projeção horizontal da estrela. A partir da geometria da estrela, parte-se para sua tesselação na etapa 3, transformando a superfície em malha e os triângulos base em faces dessa malha (E).

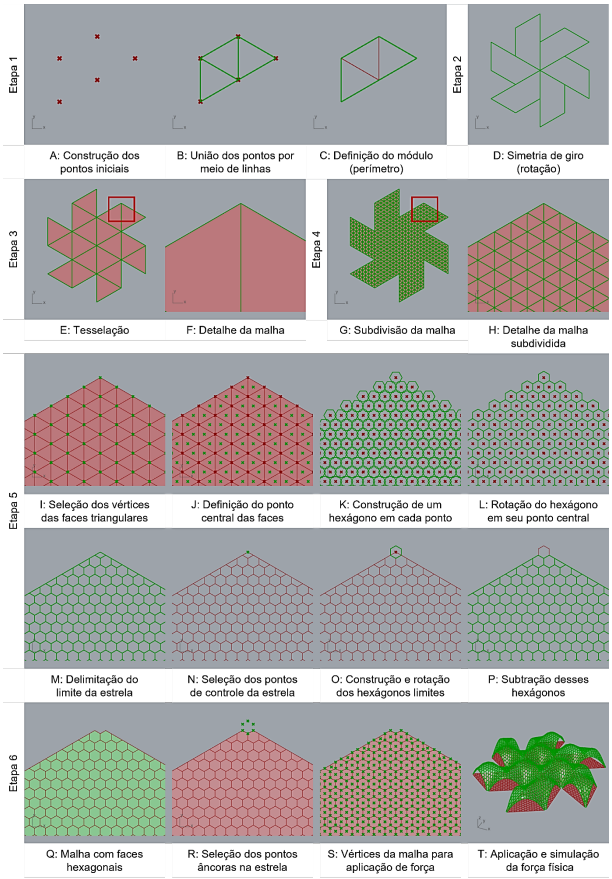


Figura 16 Representação do primeiro processo de modelagem do Pavilhão Shellstar. Fonte: Elaboração própria.

Na etapa seguinte, se estabelece o refinamento da malha, com a subdivisão das faces triangulares (G para estrela inteira e H em detalhe), com o intuito de aumentar a resolução e detalhamento da malha.

Na etapa 5, são representados os polígonos duais das faces triangulares. São selecionados os vértices (I) e os centros das faces (J) como referência para a construção dos hexágonos (K) e suas rotações (L), a fim de estabelecer um padrão regular de preenchimento da superfície da estrela. Ainda nessa etapa, é delimitado o limite dessa geometria (M) e são subtraídos os hexágonos relativos aos pontos de controle do perímetro da estrela (N, O e P).

Por fim, na etapa 6, são configuradas e aplicadas as forças físicas. Para isso, torna-se necessário reconstruir a malha em faces hexagonais (Q), selecionar os pontos âncora no perímetro da estrela (R) e definir os pontos de aplicação da força como sendo os vértices da malha (S). Ao final do processo de modelagem do Pavilhão Shellstar, a geometria obtida pode ser vista na Figura 16.

4.2 Redefinição da Estrutura de Saber da Shellstar

Em um primeiro momento foi desenvolvida a programação a partir da lógica apresentada anteriormente, focando na obtenção da geometria por meio de um processo físico de geração da forma. Este processo seguiu a adaptação feita por Singla (2019) e Raghu (2019) ao modificar a composição da malha para um conjunto exclusivamente de polígonos hexagonais, devido à falta de material que explicasse a configuração contendo um pentágono como polígono central. Com a estrela de seis pontas, o polígono central assume a forma de um hexágono, que é compatível tanto com a malha triangular (Figura 17A) quanto com a malha hexagonal totalmente regular em todo o projeto (Figura 17B).

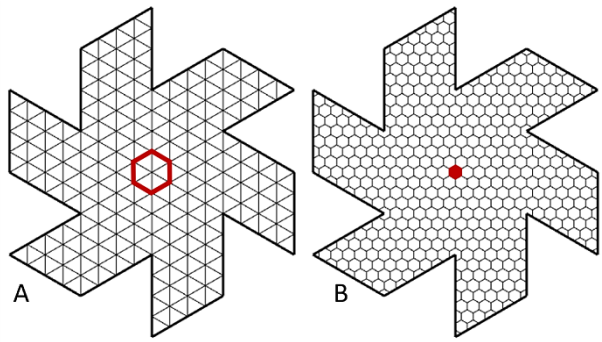


Figura 17 Padrão triangular (A) e hexagonal (B) de preenchimento da estrela de seis pontas com o polígono central destacado em vermelho. Fonte: Elaboração própria.

Ao observar a estrela de cinco pontas do projeto original, é possível notar que o elemento central se encaixa na malha composta por triângulos. Isso ocorre porque esses elementos se adaptam à estrutura da malha, apresentando uma deformação cada vez maior à medida que se aproximam do centro da estrela, conforme ilustrado na Figura 18A. Ou seja, o padrão triangular adotado para a etapa de subdivisão da face não contém somente triângulos equiláteros, pois a origem dos triângulos (faces do módulo) são triângulos isósceles e equiláteros. Isto significa que a dificuldade estava no fato de que o padrão desejado para a estrela de cinco pontas era hexagonal, um padrão dual da malha triangular.

Como consequência, uma possível alternativa para alcançar o padrão hexagonal dessa malha seria adotar o processo transformação dos triângulos em seus polígonos duais, que são os hexágonos. Nesse procedimento, há uma deformação dos hexágonos, quanto mais próximos ao centro da estrela (Figura 18B). Essa deformação ocorre, pois, os triângulos que dão origem a eles já apresentavam esse comportamento, embora menos aparente (Figura 18A).

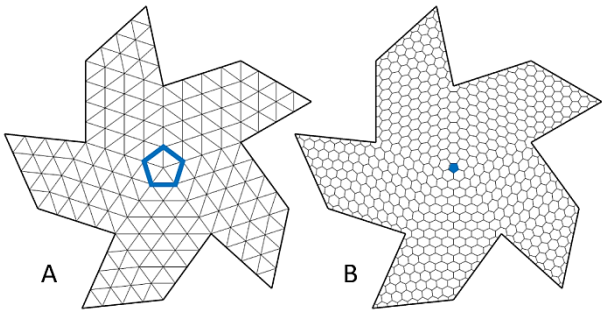


Figura 18 Padrão triangular e hexagonal de preenchimento da estrela de cinco pontas com o polígono central destacado em azul. Fonte: Elaboração própria.

Essa solução proporcionou uma nova configuração que se aproximava do padrão desejado, possibilitando avançar no processo de modelagem. Porém, quando se aplica tal transformação pela dualidade dos polígonos, o padrão hexagonal apresenta uma estrutura diferente daquela desenvolvida por Matsys. Isso resulta em elementos (faces) rotados em relação a disposição original, conforme pode ser observado nas imagens da Figura 19.

No padrão hexagonal dos polígonos duais (Figura 19A) as faces da malha localizadas nas extremidades (cantos) possuem um maior número de arestas em comparação com o padrão proposto por Matsys (Figura 19B). Essa diferença é evidenciada no encontro das pontas da estrela, onde há uma aresta a menos entre os padrões (círculo verde na Figura 19B). Na Figura 19, os elementos que se equivalem são destacados com a mesma cor nas imagens A e B, permitindo visualizar as diferenças nas organizações do padrão hexagonal.

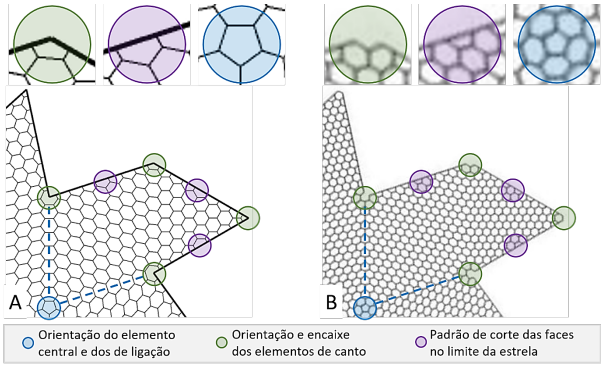


Figura 19 Comparativo das faces hexagonais das estrelas de cinco pontas geradas a partir de polígonos duais (A) e da padronização apresentada por Matsys (B). Fonte: Elaboração própria (A) e modificado a partir de Matsys (c2022) (B).

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

Na Figura 20, é apresentada a comparação entre o módulo desenvolvido a partir do Voronoi (A) e o proposto por Matsys (c2022) (B). Apesar da diferença de escala dos polígonos da malha, a nova divisão da superfície em padrão hexagonal é

equivalente à proposta do escritório. Esta nova configuração foi possível de obter a partir do emprego da modelagem paramétrica com o plug-in Grasshopper, que incorpora tal padrão como uma técnica de representação.

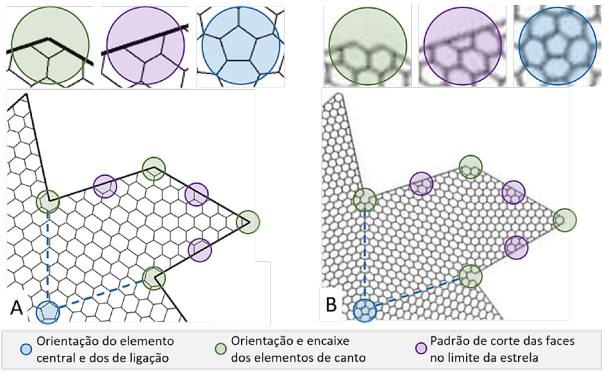


Figura 20 Comparativo das faces hexagonais das estrelas de cinco pontas geradas a partir do diagrama de Voronoi (A) e da padronização apresentada por Matsys (B). Fonte: Elaboração própria (A) e modificado a partir de Matsys (c2022) (B).

Então, embora Matsys (c2022) não tenha mencionado explicitamente a presença do padrão de Voronoi durante o processo de projeto do pavilhão Shellstar, a nova organização espacial viabiliza conceitos iniciais do projeto. Isso por que as células hexagonais na estrela de cinco pontas não são uniformes, o que é resolvido devido o Voronoi ser um padrão de subdivisão irregular da superfície. Essa alteração permitiu retomar a referência inicial da flor da orquídea de Hong Kong e simplificar a geração das faces da malha.

No entanto, para a redefinição do processo de modelagem, foi necessário fazer alterações na ordem de representação da geometria. No primeiro processo, a estrela de seis pontas apresentava uma triangulação que cobria a superfície de maneira regular, o que permitia criá-la por intermédio da repetição do módulo por rotação em série. Em seguida, a tesselação e a subdivisão eram aplicadas. Ao lidar com a estrela de cinco pontas, essa sequência não pôde ser replicada pois os triângulos resultantes da subdivisão (faces da malha) não eram mais idênticos, como foi visto anteriormente na Figura 18. Assim, não se obtinha a regularidade da divisão triangular da estrela, conforme ilustrado na Figura 21A.

Para garantir um padrão triangular regular nas cinco pontas da estrela, as etapas de tesselação e subdivisão foram aplicadas primeiramente no módulo, que corresponde a uma das pontas da estrela. Somente após essas etapas serem concluídas no módulo que ele passou a ser rotado e repetido, para formar a estrela de cinco pontas, ilustrada na Figura 21B.

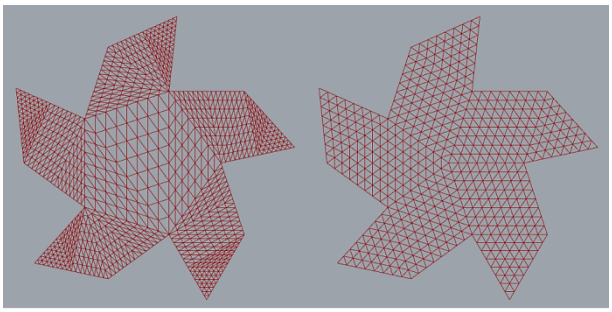


Figura 21 Comparação das malhas subdivididas a partir de duas sequências de modelagem. Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 21 está disposta a geometria das duas estrelas de cinco pontas construídas como malhas, mas que para simplificação estão com visualização apenas de suas arestas. No primeiro caso, a estrela baseada na sequência anterior (A) apresenta triângulos com deformações e com demasiada diferença de escala entre eles, enquanto que com a nova ordem das etapas (B), apesar dos triângulos não serem idênticos, estes apresentam uma regularidade principalmente quanto à escala dos triângulos, situados em todo o padrão.

Assim, entende-se que há uma redefinição da estrutura de saber anterior, conforme Figura 22, que considera não só o discurso e representações oficiais do escritório, mas também adiciona as técnicas envolvidas na representação da geometria. Na figura, as expressões assinaladas com letra vermelha constituem elementos reestruturados ou ampliados em relação a estrutura anteriormente apresentada.

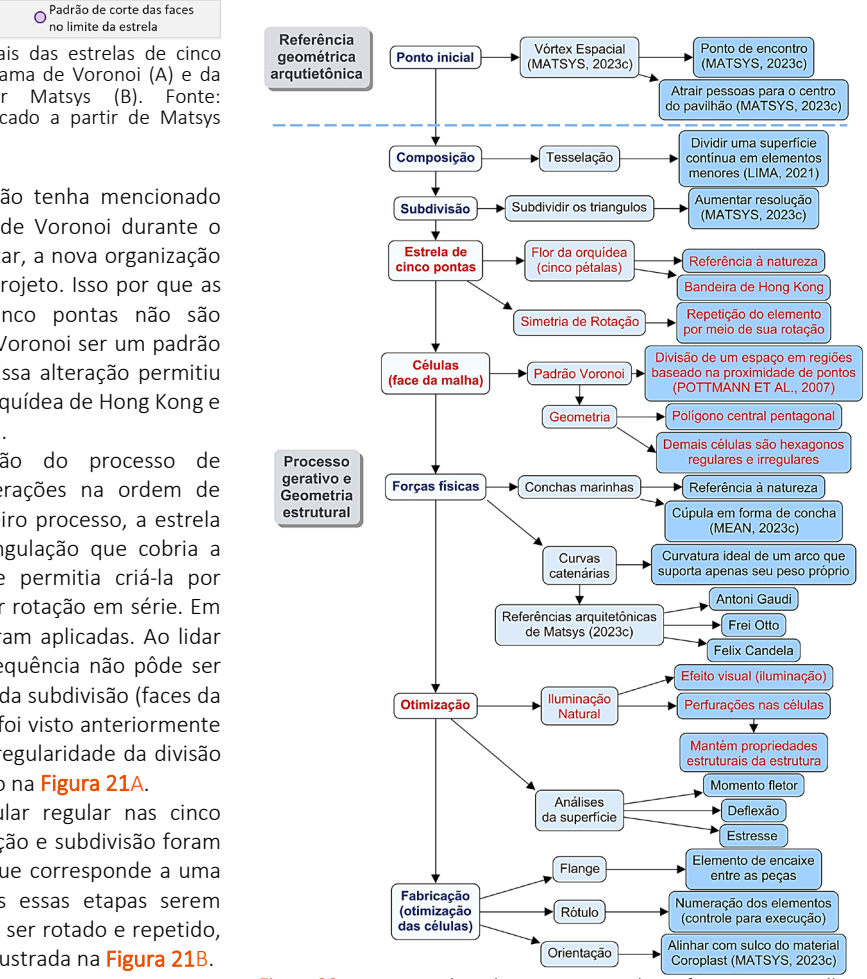


Figura 22 Estrutura de saber reestruturada, referente ao Pavilhão Shellstar. Fonte: Elaboração própria.

Além disso, a estrutura de saber que foi explicitada durante o desenvolvimento das demais obras também está presente na estrutura de saber do Pavilhão Shellstar. Isso por que as questões de iluminação natural não foram abordadas no primeiro lançamento por envolverem lógicas mais complexas e que exigiam uma maior compreensão das malhas. O avanço na pesquisa passa a viabilizar a modelagem das perfurações nas células, garantindo que se mantenha a estrutura geométrica de uma malha. Com isso, parte-se para um novo esquema síntese do processo de projeto da Shellstar, apresentado na Figura 23.

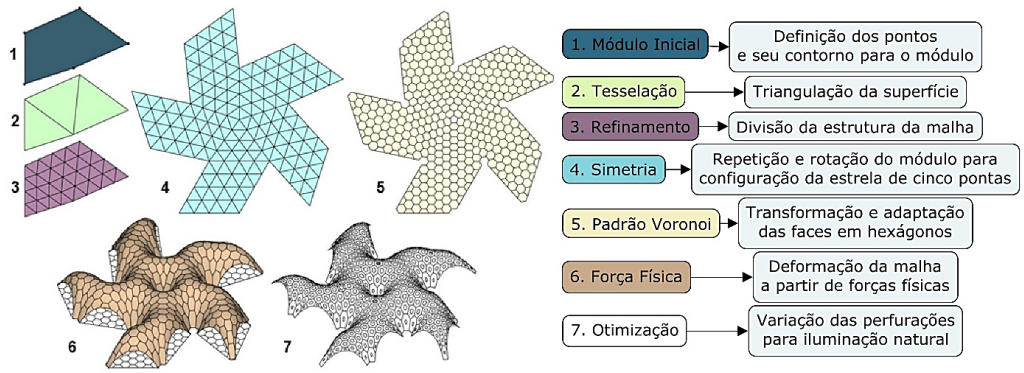


Figura 23 Redefinição do esquema síntese do algoritmo e suas etapas para a geração da forma da Shellstar. Fonte: Elaboração própria.

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

Com base nesse esquema síntese e suas etapas (**Figura 23**), avança-se para o processo de modelagem do Pavilhão Shellstar por meio da programação visual, agora revisada e apresentada na **Figura 24**.

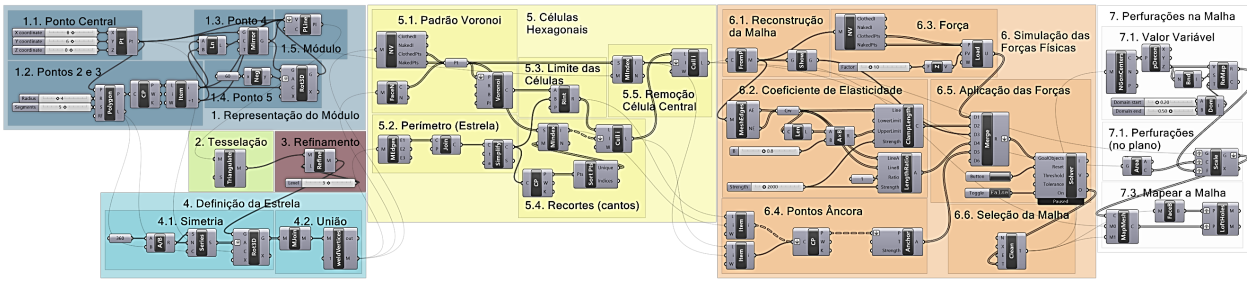


Figura 24 Programação visual para o modelo da Shellstar depois de reestruturar o processo de concepção da forma. Fonte: Elaboração própria.

Na **Figura 25**, são apresentadas as imagens que representam as etapas iniciais do processo de modelagem: a construção do módulo base (etapa 1), a tesselação dessa figura (etapa 2), o refinamento dessa malha (etapa 3) e a definição da estrela base do projeto (etapa 4).

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

Na segunda etapa, caracterizada pelo processo de tesselação, o objetivo é estabelecer a malha utilizada no projeto – ou parte dela. Esse procedimento é ilustrado na **Figura 25** I. Em seguida, na etapa 3, ocorre o refinamento da malha (J), que visa subdividir suas faces para – em outras etapas - otimizar a geometria do projeto. Por fim, realiza-se a rotação em série do módulo subdividido (K), resultando na formação de uma estrela de cinco pontas (L). Depois, na **Figura 26**, é representada a etapa 5 do processo de modelagem da Shellstar, em que a malha triangular é transformada em hexagonal.

A partir das faces subdivididas em toda a estrela, são extraídos os vértices da malha (A) e os centros as suas faces (B). Esses pontos são utilizados para a construção do padrão de Voronoi (C e D). Em seguida, são selecionadas as arestas do perímetro da estrela (E), que são unidas (F) a fim de simplificar a curva final (G). Isso reduz o número de pontos de controle e segmentos da curva - necessária para etapas posteriores - cujos pontos serão utilizados como âncoras no processo de aplicação das forças físicas. Depois, essa curva simplificada intersecciona a geometria do Voronoi (H), para remover partes que estão além do limite da estrela.

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

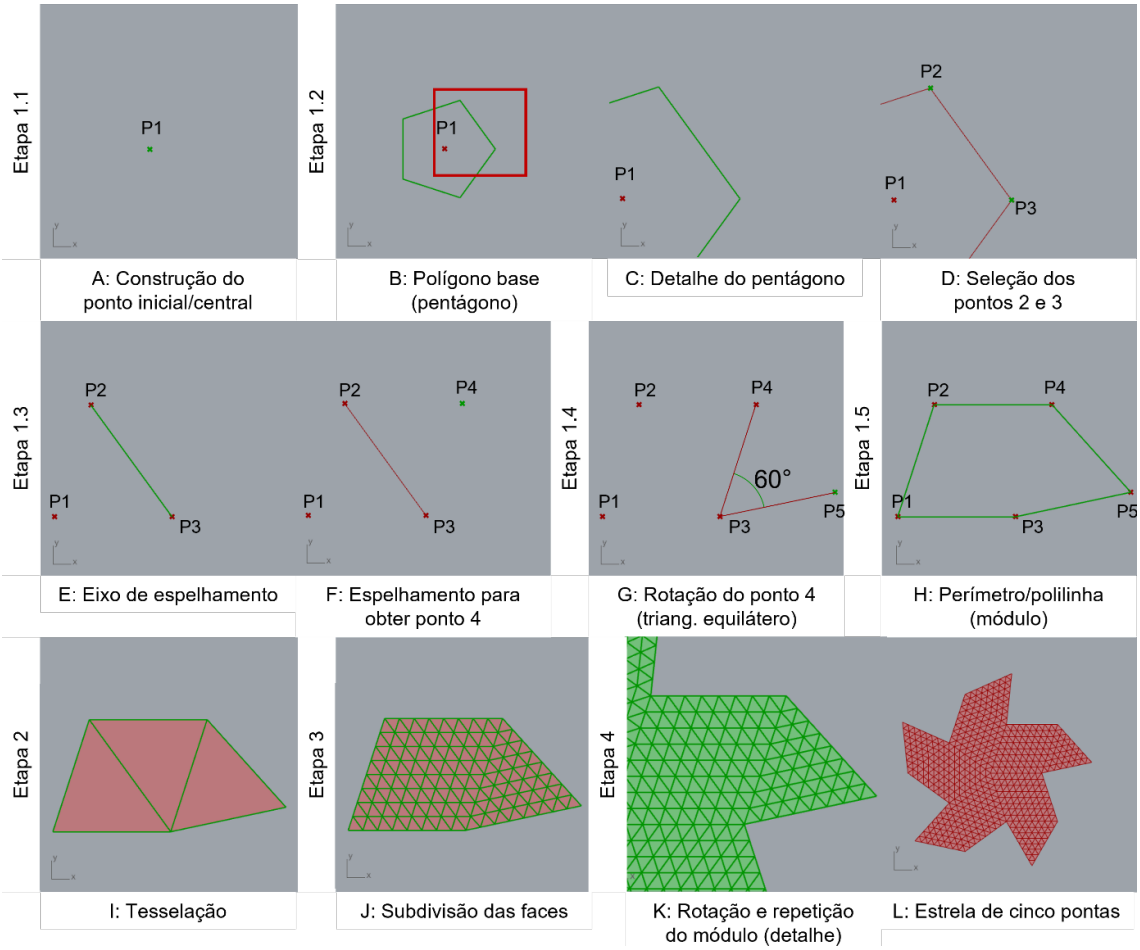


Figura 25 Representação gráfica das etapas 1, 2, 3 e 4 do modelo da Shellstar. Fonte: Elaboração própria.

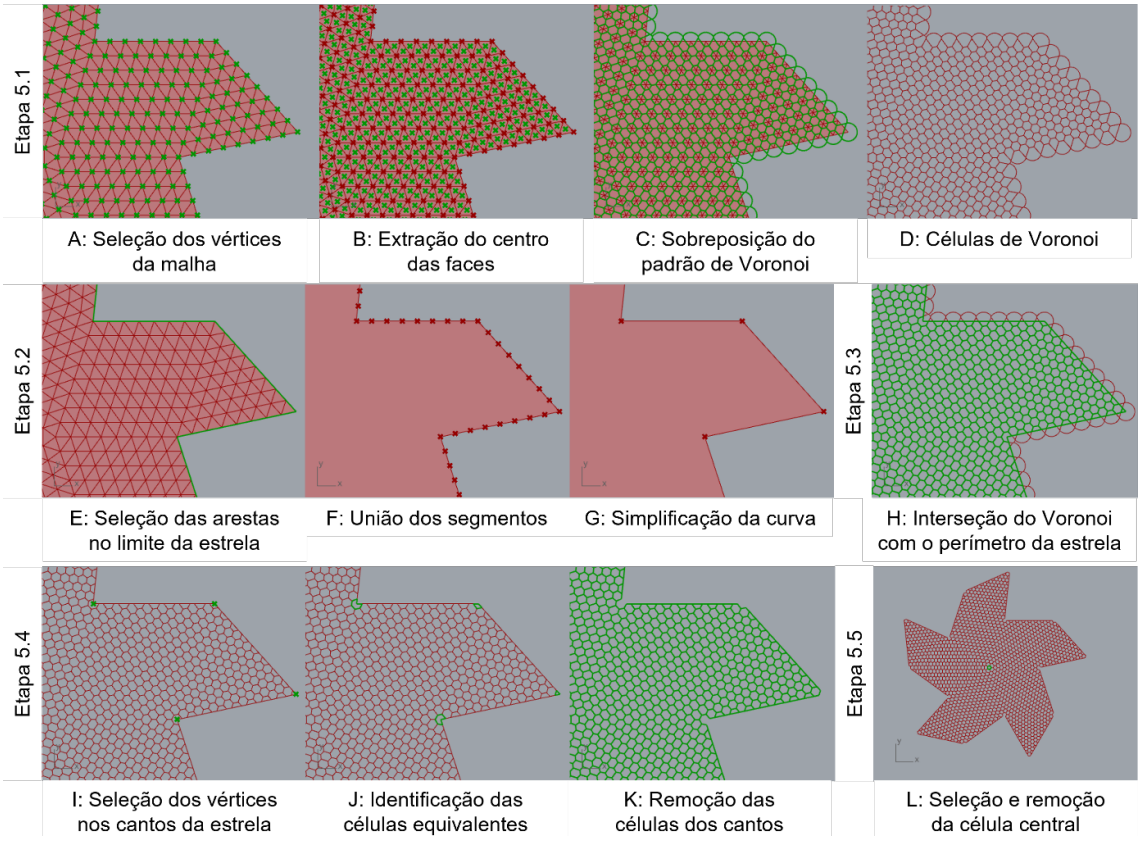


Figura 26 Representação gráfica da etapa 5 do modelo da Shellstar. Fonte: Elaboração própria.

Por fim, na Figura 27, podem-se visualizar as imagens referentes às etapas 6 e 7 do processo de modelagem, seguindo a abordagem da programação visual já apresentada. Essas etapas envolvem a "preparação" dos elementos para a

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

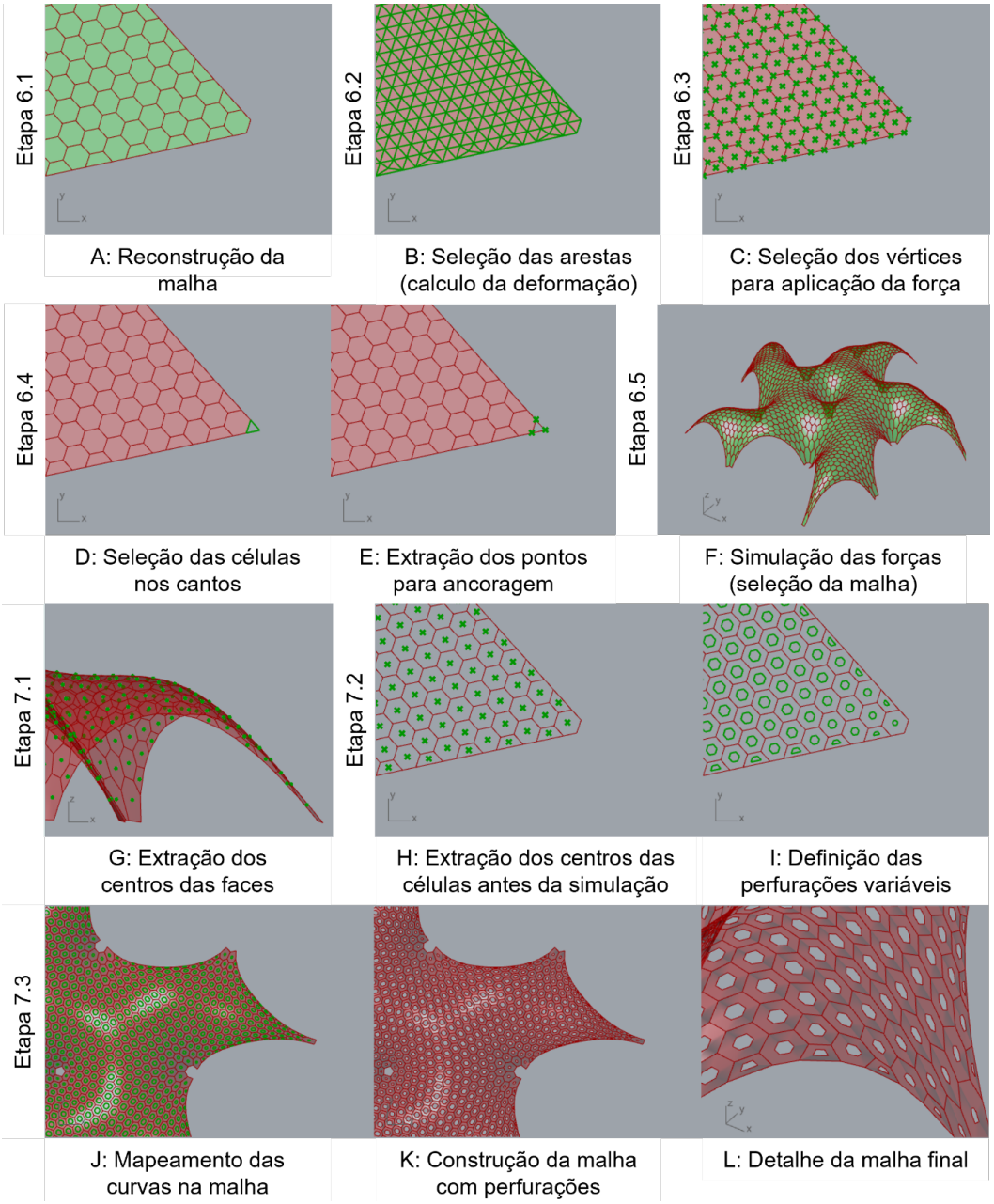


Figura 27 Representação gráfica das etapas 6 e 7 do modelo da Shellstar. Fonte: Elaboração própria.

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

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

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

polígonos correspondentes às perfurações, para construir uma nova malha com base nesses elementos (K e L).

Ao final do processo de programação, a geometria obtida com essa modelagem pode ser vista na Figura 28.

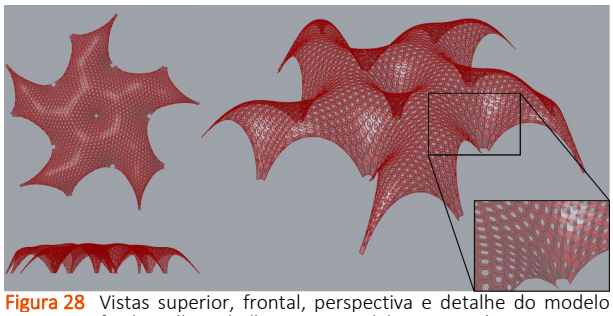


Figura 28 Vistas superior, frontal, perspectiva e detalhe do modelo final Pavilhão Shellstar. Fonte: Elaboração própria.

4.3 Revisão das classificações iniciais

A partir dos conceitos analisados e da modelagem proposta, retoma-se a classificação do projeto quanto à geometria da face da malha e quanto à aplicação dessa malha junto ao projeto. Para tanto, é feita uma comparação entre os itens encontrados durante a revisão de literatura e aqueles identificados somente durante a explicitação da estrutura de saber do projeto analisado.

Na Tabela 2, está apresentada a comparação referente à classificação da geometria das faces da malha para o Pavilhão Shellstar, em cinza a classificação inicial e em verde a posterior à análise. Dentre todas as análises realizadas em Zauk (2023), nesse projeto se encontra a maior diferença entre a classificação inicial e aquela resultante da estrutura de saber. Em um primeiro momento, a classificação da geometria das faces da malha como hexagonal era condizente com o discurso dos responsáveis, que definiam que a malha era majoritariamente hexagonal. Porém, em sua estrutura de saber, identificou-se e explicitou-se que o padrão hexagonal apresentado pode ser desenvolvido a partir da divisão da superfície da estrela, ou seja, por meio do diagrama de Voronoi.

Nesse caso, a nova classificação como uma face irregular está mais condizente com a malha apresentada, pois suas faces são irregulares e apresentam maior deformação de acordo com sua posição na malha. Então, na Tabela 2, está destacada em verde a atual classificação mais condizente com a geometria das faces da malha.

Tabela 2 Classificação do Pavilhão Shellstar quanto à geometria das faces da malha.

Geometria das Faces na Shellstar			
Classificação		Inicial	Pós Est. Saber
Regular	Triagular		
	Retangular		
	Hexagonal		
Semi Regular			
Irregular	Diag. De Voronoi		
	Triang. De Delauney		

Fonte: elaboração própria.

Para a análise de função das malhas junto ao projeto do Pavilhão Shellstar (Tabela 3) foram confirmados os usos citados na etapa de revisão (computacional, otimização estrutural e geração da forma) e também foi identificada uma nova justificativa para empregar malhas no processo dessa obra, a de otimização da forma.

A função computacional ocorre a partir do sistema organizacional que determina sua geometria. O modelo matemático computacional que define a malha opera automaticamente, gerenciando a numeração e sequência dos elementos de acordo com uma lógica interna. Quando essa função é abordada em um projeto, há o benefício desse mapeamento para uma organização durante a fabricação e a montagem do projeto. No processo de projeto da Shellstar é descrito que seus elementos (faces) são numerados para estabelecer uma sequência e lógica construtiva.

Tabela 3 Classificação do Pavilhão Shellstar quanto à função da malha.

Função da Malha na Shellstar		
Função	Incial	Pós Estrutura de Saber
Representação Digital		
Computacional		
Tesselação		
Otimização da Forma		
Otimização Estrutural		
Geração da Forma		

Fonte: elaboração própria.

A otimização estrutural é uma função da malha já identificada anteriormente como meio para análises estruturais que estão presentes desde o início do processo de projeto, conforme o discurso dos responsáveis. As etapas que envolvem a otimização da forma são explicitamente descritas e ilustradas em imagens e vídeos de referência no site da empresa responsável, abordando questões como o momento fletor, deflexão e estresse da estrutura/elementos.

O uso da malha na geração da forma do projeto se caracteriza quando ela está presente desde o início do processo de concepção. Enquanto nos demais projetos existe uma geometria que passa a ser transformada em uma malha durante o processo, na Shellstar ela é manipulada analogicamente, tal ocorre na referência arquitetônica de Gaudí e suas cordas suspensas, que moldam a forma de acordo com as forças físicas aplicadas a ela.

Por fim, a otimização da forma é utilizada para resolver e suavizar superfícies não convencionais. Esse processo inicia com a otimização da malha nas fases iniciais da programação, especificamente na subdivisão das faces. No entanto, a suavidade só pode ser percebida (visível) depois da simulação de forças físicas. É nessa etapa que a deformação da malha por atuação das forças gera uma curvatura que se aproxima das curvas catenárias utilizadas por Gaudí. Então, mesmo que a otimização da malha aconteça no início do processo (subdivisão das faces), o seu efeito de suavização só é perceptível visualmente no final do processo, depois da aplicação de forças físicas.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

A conexão da Shellstar com as demais obras é a menos aparente à primeira vista, quando observado apenas o modelo geométrico final. No entanto, ao se analisar a geometria subjacente (que originou o modelo), constata-se que é aquela que está mais interligada aos conceitos geométricos compartilhados entre as demais obras.

A primeira correspondência identificada foi o uso de malhas hexagonais a partir de polígonos duais. Nesse caso, a Shellstar não explicita a dualidade na geometria final, mas esse conceito fez parte do desenvolvimento da estrutura de saber, sendo uma etapa importante do processo de identificação das faces hexagonais da malha da Shellstar. Com isso, foi possível associar diretamente a estrutura de saber do Pavilhão Shellstar com a estrutura da Biosfera de Montreal e do Projeto Eden, uma vez que compartilhavam etapas e conceitos geométricos.

Porém, após a identificação da estrutura do Water Cube, foi estabelecida uma correlação entre os conceitos e estratégias adotadas em relação a esse projeto. O padrão de divisão de superfície presente na fachada do centro aquático, o Voronoi, também foi uma etapa fundamental no processo de

concepção da Shellstar. Enquanto no Water Cube o Voronoi é um resultado do processo de conformação da geometria final (o projeto tem como resultado o padrão quando a estrutura fica projetada nos planos retos ortogonais que definem a sua fachada), na Shellstar esse padrão é uma etapa adotada durante o desenvolvimento da forma – para obter a dualidade das faces triangulares e hexagonais -, não ficando aparente na geometria final.

Com isso, a estrutura de saber da Shellstar estabelece uma relação entre todos os projetos anteriormente analisados na pesquisa, mesmo que explicitamente um processo não faça referência ao outro. Ou seja, mesmo que os discursos dos arquitetos não abordem uma relação geométrica, eles possuem uma estrutura de saber comum.

Então, o saber explicitado sobre a geometria que conforma o Pavilhão Shellstar integra conceitos geométricos de outras obras analisadas no contexto da pesquisa: o processo de projeto se utiliza de polígonos triangulares (elemento principal da malha na Biosfera de Montreal), hexagonais (utilizados nas duas camadas do Projeto Eden) e o padrão Voronoi (destacado na fachada do Water Cube). No entanto, adiciona técnicas de aplicação de forças físicas (otimização).

Ao analisar as estratégias de aplicação de forças físicas, percebe-se que sua estrutura de saber está diretamente relacionada com as obras de Gaudí – constatado no discurso do arquiteto responsável pela Shellstar.

Essa descoberta destaca a importância de explorar e revisitar as estruturas de saber ao longo do processo de pesquisa. A conexão entre os projetos pode não ser explícita, mas a influência de conceitos geométricos compartilhados enriquece a compreensão da arquitetura contemporânea e reforça a importância de uma abordagem holística.

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

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

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

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste estudo, a geometria implícita em projetos contemporâneos de arquitetura foi explorada, destacando-se a importância das malhas e da parametria como ferramentas fundamentais na concepção e realização dessas obras. É relevante ressaltar a importância da transposição do conhecimento científico para o contexto profissional e educacional. A importância de aliar técnica e geometria para compreender e aplicar os princípios discutidos por Matsys e outros autores no contexto da arquitetura contemporânea é exemplificada pelo projeto Shellstar. Esta transposição não apenas enriquece a prática profissional, mas também pode servir como base para o desenvolvimento de currículos educacionais mais abrangentes e atualizados.

Neste estudo é demonstrado que a compreensão da geometria subjacente aos projetos arquitetônicos contemporâneos não é apenas uma questão de estética ou técnica, mas sim uma abordagem integrativa e didática para a compreensão de novas possibilidades de design e inovação. Ao reconhecer e explorar essa geometria de forma holística, não apenas obras de arquitetura mais eficientes e responsivas podem ser criadas, mas também pode-se inspirar e capacitar as mentes criativas do futuro.

REFERÊNCIAS

1. ANCHETA-ADRIAS, Ria. 1/365: **Flag of Hong Kong**. 8 set. 2008. Fotografia. Disponível em: < https://tinyurl.com/yn38s7xh>. Acesso em: 21 abril 2023.
2. BURRY, Jane; BURRY, Mark. **The new mathematics of architecture**. Thames & Hudson. 2010
3. CARMO, M. P. **Superfícies Mínimas**. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA, 1987.
4. CHEVALLARD, Y**. La Transposición Didáctica**: del saber sabio al saber enseñado. La Pensée Sauvage, Argentina, 1991.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. HUERTA, S. Structural Design in the Work of Gaudi. **Architectural Science Review**. V. 49.4, pp. 324-339, 2006.

9. 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

10. 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.

11. 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

12. 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

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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

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

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

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

20. MERCADANTE, Mauricio. **Unha-de-vaca (Bauhinia × blakeana)**. Fev. 2010. Fotografia. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/43256055@N03/4422623500>. Acesso em: 21 abril2023.

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

22. 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.

23. 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

24. 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.

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

26. RODRIGUES, Álvaro J. **Geometria Descritiva**. Projetividades, Curvas e Superfícies. 3. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico Ltda, 1960. 413 p.

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

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

29. ZAUK, Fernando. **Malhas em projetos paramétricos com superfícies complexas**: Um repertório formativo para arquitetura. Orientador: Janice de Freitas Pires. 2023. 245 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

30. ZAUK, Fernando; PIRES, Janice. Malhas em projetos paramétricos com superfícies complexas: Um repertório formativo para arquitetura. **Design E Tecnologia**, v. 13, n. 26, p. 119-141, 7 jul. 2023. DOI 10.23972/det2023iss26 pp119-141. Disponível em: https://www.ufrgs.br/det/index.php/det/article/view/1024. Acesso em: 18 abr. 2024.