

**A GEOMETRIA COMPLEXA DA ARQUITETURA EM UMA ABORDAGEM
INTEGRATIVA ENTRE ENSINO E SUSTENTABILIDADE**

***THE COMPLEX GEOMETRY OF ARCHITECTURE IN AN INTEGRATIVE
APPROACH BETWEEN TEACHING AND SUSTAINABILITY***

Janice de Freitas Pires¹

Adriane Borda²

Brunna Pereira de Oliveira³

Letícia Pereira Paixão⁴

Resumo

Este artigo apresenta os resultados até o momento de um projeto de pesquisa que reúne os campos do ensino de representação gráfica e projeto de arquitetura. O estudo emprega uma abordagem integrativa para uma formação em representação, alinhada com a preocupação quanto à funcionalidade dos edifícios frente às questões ambientais, a partir do estudo de geometrias complexas que são adotadas em obras referenciais. Tendo por base a noção estruturada de um saber (técnicas, tecnologias e teorias), de Yves Chevallard, são desenvolvidas atividades de análise de obras concebidas com tais geometrias conjuntamente com os discursos de seus arquitetos, visando compreender as relações que possuem com os aspectos de sustentabilidade. A estrutura de saber ainda integra processos de modelagem paramétrica das obras referenciais, considerando-se que esta promove uma maior compreensão dos parâmetros de configuração geométrica. Os resultados se referem à explicitação deste saber em termos teóricos e tecnológicos, para apoiar atividades de representação, especialmente com técnicas de modelagem paramétrica, a serem inseridas na formação de arquitetura.

Palavras-chave: geometria complexa; ensino de arquitetura; modelagem paramétrica; sustentabilidade.

Abstract

This article presents the results to date of a research project that brings together the fields of teaching graphic representation and architectural design. The study employs an integrative approach to training in representation, aligned with the concern regarding the functionality of

¹ Professora Doutora, Universidade Federal de Pelotas, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Pelotas, RS, Brasil. janicefp@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1975-3147

² Professora Doutora, Universidade Federal de Pelotas, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Pelotas, RS, Brasil. adribord@hotmail.com; ORCID: 0000-0001-6760-6566.

³ Acadêmica, Universidade Federal de Pelotas, RS, Brasil. brunnapo@hotmail.com; ORCID: 0000-0002-4221-5953.

⁴ Acadêmica, Universidade Federal de Pelotas, RS, Brasil. leticia.p.paixao@hotmail.com; ORCID: 0000-0002-1640-8751

buildings in relation to environmental issues, based on the study of complex geometries that are adopted in reference works. Based on the structured notion of knowledge (techniques, technologies and theories), by Yves Chevallard, activities are developed to analyze works designed with such geometries together with the discourses of their architects, aiming to understand the relationships they have with aspects of sustainability. The knowledge structure also integrates parametric modeling processes of reference works, considering that this promotes greater explanation of the geometric configuration parameters. The results refer to the explanation of this knowledge in theoretical and technological terms, to support representation activities, especially with parametric modeling techniques, to be inserted in architecture training.

Keywords: complex geometry; architectural teaching; parametric modeling; sustainability.

1. Introdução

Em face ao desenvolvimento tecnológico atual, o projeto em Arquitetura vem passando por grandes quebras de paradigmas, trazendo mudanças à própria maneira de projetar com a inserção de dispositivos computacionais ao longo de todo o processo de projeto e de construção. Neste contexto, iniciativas de configuração formal, utilizadas por arquitetos do passado, têm sido replicadas em processos projetuais na arquitetura contemporânea recente (BURRY, M.; BURRY, J., 2010).

Alguns destes exemplos fundamentam-se no desenvolvimento tecnológico que possibilita integrar ambientes digitais de representação gráfica e simulação para a busca da forma e a sua otimização. No entanto, alguns arquitetos se baseiam na exploração do funcionamento dos sistemas naturais, seus processos e a formação de suas geometrias, tal como aplicado por Gaudì, Frei Otto, Félix Candela, Heinz Isler e Luig Nervi no passado (PEREZ-GARCIA, A.; GÓMEZ-MARTÍNEZ, 2009).

A conexão entre práticas de projeto computacional e fenômenos da natureza surge como uma abordagem potente na arquitetura, no sentido de economia de materiais e integração qualitativa com o ambiente ou o lugar de sua inserção. Como consequência destas abordagens, a arquitetura contemporânea dos últimos 20 anos tem se caracterizado pela adoção de geometrias de grande complexidade, fundamentadas em um senso estético/formal, no seu desempenho estrutural e de conforto ambiental, ou até mesmo nas técnicas presentes em dispositivos computacionais, como a modelagem paramétrica, a qual facilita a proposição pelos arquitetos de tais geometrias (LITTMAN, J. A., 2009; BURRY & BURRY, 2010; BERTOL, 2011).

A presença de esta realidade nos escritórios de arquitetura delimitou um problema didático para as escolas, relativo à preparação do futuro profissional de arquitetura. O objetivo do presente trabalho é apresentar os resultados de um projeto de pesquisa, (AMPARA-Análise e Modelagem Paramétrica da Geometria Complexa da Arquitetura, da FAURB-UFPe), o qual busca promover uma investigação sobre o emprego de superfícies complexas na arquitetura, visando à construção de referenciais didáticos como suporte à ação projetual.

Anteriormente ao projeto em questão e frente a este contexto, foi desenvolvida uma pesquisa de doutorado (2014-18) para investigar o tipo de estrutura de saber associado ao

emprego de superfícies complexas na arquitetura. Naquele momento, a partir de uma teoria didática, foi feito um reconhecimento e explicitação da estrutura de saber de um conjunto de superfícies da arquitetura descritas em Burry & Burry (2010), apoiando-se em autores da área da representação gráfica, da matemática, de estruturas e da geometria aplicada ao design. Tal estudo está sistematizado em Pires (2018) e Pires e Pereira (2019; 2020) e, na sua conclusão, evoluiu para a constituição de uma rede de conceitos e técnicas de suporte ao ensino de arquitetura.

Em 2019 foi criado o projeto AMPARA visando, então, desenvolver o mesmo tipo de estudo direcionado ao contexto curricular, por meio do reconhecimento dos conteúdos didáticos das disciplinas que possam estar relacionados com a estrutura de saber da geometria complexa da arquitetura.

Neste artigo será apresentado como o projeto tem alcançado a meta de contribuir ao reconhecimento da aplicabilidade de tais geometrias e de ir além dos aspectos técnicos da representação ao explorar a modelagem paramétrica para conhecer e explicitar aspectos funcionais e qualitativos de tais geometrias.

2. Revisão de Literatura

As etapas de revisão bibliográfica orientaram o reconhecimento da geometria complexa utilizada em obras de arquitetura dos séculos XX e XXI, bem como seus conceitos históricos e princípios de desempenho.

Ao longo de este reconhecimento, além dos aspectos de desempenho estrutural, também se identificou uma preocupação dos arquitetos com as questões de sustentabilidade na arquitetura e até mesmo com abordagens de regeneração, tal como aponta Littmann (2009). Particularmente, a visão sobre a mudança na maneira de pensar projeto e a identificação da insuficiência da arquitetura bioclimática no que tange as questões ambientais, segundo Gonçalves; Duarte (2006). Para estas autoras, mesmo tendo sua importância e caráter evolutivo ao longo da história, acabou sendo banalizada a partir da Segunda Guerra Mundial. O descrédito nesta abordagem caminhou paralelamente ao imaginário de que as novas tecnologias desenvolvidas poderiam oferecer total controle às condições climáticas de edifícios, o que acarretou um fluxo cíclico de criação de caixas de vidro na arquitetura, gerando um consumo de energia intenso no mundo inteiro. Ata-se a tais questões o fluxo exacerbado de urbanização no século XX (HOLANDA, 2010) e o processo de crescimento econômico desenfreado, que desencadeou uma série de eventos catastróficos no meio ambiente, dado o caráter exploratório de recursos naturais.

Os fatores, quanto somados, fazem transparecer as razões por trás da crise climática responsável pelo aquecimento global (PIRES; SILVEIRA; FIALHO, 2016), bem como o papel de arquitetos e seu poder de decisão na intensificação ou mitigação dos problemas ambientais. A arquitetura regenerativa, portanto, surge de maneira evolutiva como uma solução às demandas climáticas a fim de evitar-se a morte do planeta (PIRES; SILVEIRA; FIALHO, 2016). As temáticas sustentabilidade e bioclimática na arquitetura, conseqüentemente, tornam-se insuficientes aos problemas ambientais da atualidade, visto que a redução de impactos ambientais não é suficiente para o balanceamento de ecossistemas (DIAS, 2015).

As discussões sobre o tema rompem no século XX, especialmente em 1994 com a publicação do livro de John Tillman Lyle “Regenerative Design for Sustainable Development” que desenvolve a ideia do caminhar unido da arquitetura e design regenerativo e define as

primeiras ideias para a área (NIGUDKAR, s.d.). Através de seu conceito de alto desempenho produtivo, visto que vai além do que se entende no campo da arquitetura e urbanismo como design sustentável (BAPER; KHAYAT; HASAN, 2020), a arquitetura regenerativa aponta a necessidade de soluções diversas a um problema, bem como a atuação de edifícios como sistemas vivos, assim contendo em seus princípios fundação argumentativa da área da biomimética.

Pode-se relacionar a arquitetura regenerativa ao Relatório Brundtland, titulado de “Our Common Future” (1987), que aponta “soluções concretas que atendam nossas necessidades sem comprometer às futuras”. Escritórios de arquitetura ao redor do mundo têm incorporado a urgência do tema em suas metodologias projetuais, não somente projetando edifícios que respondam tecnologicamente para reduzir o impacto de seus processos construtivos e de seu ciclo de vida, mas também a partir de abordagens que procuram traduzir o problema ao processo projetual. Neste sentido, tecnologias de representação digital, como o desenho paramétrico, têm viabilizado a concepção de projetos responsivos a uma amplitude de variáveis que caracterizam projetos focados em regeneração.

O surgimento do desenho paramétrico, na área de projetos e tomada de decisões, exige uma série de conhecimentos sistemáticos e definições apoiadas na geometria (HERNANDEZ, 2006), a fim de assessorar a concepção de geometrias complexas, especialmente aquelas que podem ter seu papel em relação à sustentabilidade, tais como as inspiradas em padrões presentes na natureza.

Identifica-se, dessa maneira, a necessidade de traduzir para a formação em arquitetura conteúdos que integrem análise e representação de geometrias complexas empregadas em projetos de arquitetura referenciais, voltados a sustentabilidade.

3. Metodologia

A pesquisa ampara-se na noção estruturada de um saber, de Chevallard (1999). Esta teoria oferece um modelo de análise, a partir do conceito de organização praxeológica, que se refere à estrutura lógica da ação humana e a qual possui quatro elementos que se associam de maneira dinâmica: os problemas ou tarefas, as técnicas de resolução das tarefas, as tecnologias que justificam, explicam e produzem as técnicas, e as teorias, que possuem o mesmo papel em relação às tecnologias, de explicação, justificação e produção. O saber, para este autor, além de ser um objeto dinâmico sujeito a transformações, conforme o contexto de sua aplicação (CHEVALLARD, 1991), está constituído por uma estrutura integral a partir de tais elementos e assim deveria se apresentar em um contexto educativo.

Visando explicitar tal estrutura integral do saber, a pesquisa desenvolve-se a partir das seguintes etapas: ESTRUTURAÇÃO do saber a partir da revisão de literatura e de análises de obras de arquitetura; a PROPOSIÇÃO das atividades didáticas que envolvam as estruturas de saber reconhecidas; a EXPERIMENTAÇÃO e a AVALIAÇÃO/REESTRUTURAÇÃO das atividades; e a SISTEMATIZAÇÃO a partir da constituição de uma rede de conceitos de apoio ao ensino de arquitetura.

A etapa de revisão bibliográfica aborda os temas geometria, matemática e arquitetura a partir dos estudos desenvolvidos por: Barrios (2006); Burry & Burry (2010); Bertol (2011); Carmo (1987); Chilton; Macdonald, Pedreschl, (2000); Chilton & Chung (2017); Fernandez (2010); Kolarevic (2003); Pottmann et al (2007); Huerta (2006); Lorenzi & Francaviglia (2010); Minifie (2010); Otto (1981); Perez-Garcia & Gómez-Martínez (2009); Rippmann & Block (2013);

Rodrigues (1960); e Shelden (2002). Tendo-se identificado em Bertol e Perez-Garcia, Gómez-Martinez um propósito comum de observar relações entre geometrias complexas e formas da natureza com princípios de otimização, sustentabilidade e regeneração, passou-se a investigar obras de arquitetura sob a hipótese de ilustração da aplicação de tais abordagens.

Com o objetivo de realizar uma pesquisa integrativa e de interesse formativo para o processo projetual de arquitetura, tais referenciais foram correlacionados com teorias abordadas em disciplinas de projeto, propriamente ditas. Dentre elas, inclui-se a abordagem com ênfase no desenvolvimento da consciência construtiva, apoiada em BAEZA (2003), a qual diferencia características dos objetos arquitetônicos entre os tipos Tectônicos e Esteriotômicos. Foram, também, consideradas as abordagens da biomimética aplicada ao projeto de arquitetura (LOBACH, 2000; REBELLO, 2000; e SANTOS, 2010) e da arquitetura regenerativa (LITTMAN, 2009).

4. Resultados

Até o momento, foram investigadas 6 obras, selecionadas pela confluência dos seguintes fatores:

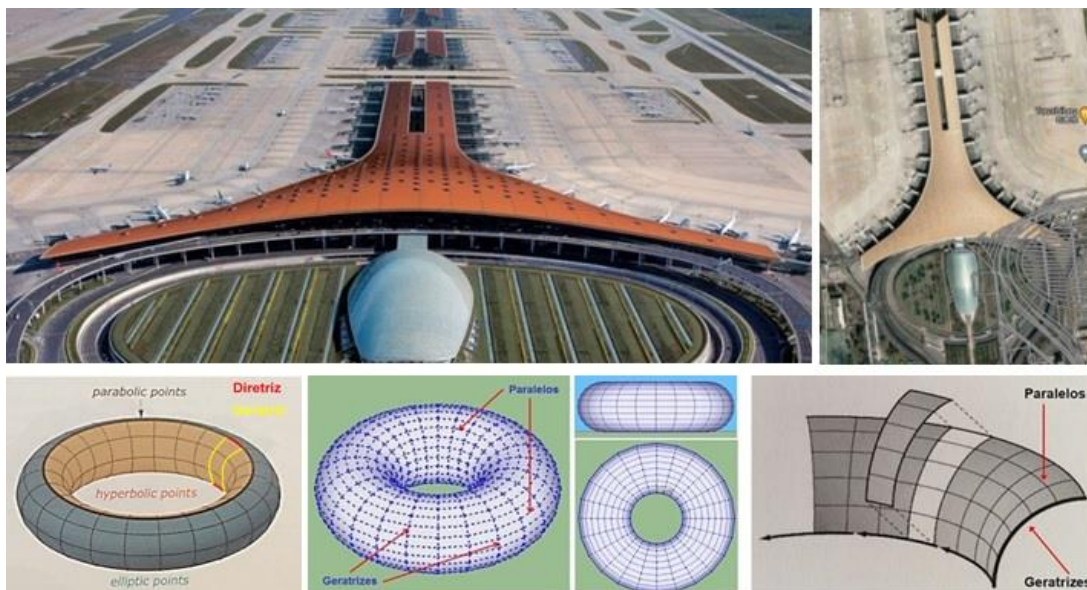
- 1) interesse e percepção, por parte do corpo discente envolvido na pesquisa, sobre a relação da obra com os temas da revisão bibliográfica;
- 2) disponibilidade de acesso à documentação arquitetônica e aos discursos dos projetistas;
- 3) níveis de compreensão da geometria da obra e de apropriação dos procedimentos de programação visual para representar as complexidades formais envolvidas, por parte da equipe do projeto.

Neste artigo são relatados os resultados, a partir da descrição das obras abordadas associadas às estruturas de saber constituídas, sejam como hipóteses sobre a relação aos temas abordados ou como identificação destas relações a partir da revisão sobre os discursos encontrados na revisão bibliográfica.

4.1. O Caso do Projeto Aeroporto de Beijing, de Foster & Partners

O projeto do Aeroporto de Beijing, de Foster & Partners, Figura 1, associa-se ao discurso da conformação de uma superfície de revolução: um toro. As características de simetria e de continuidade geradas por um movimento de revolução de uma curva conferem, sobre a superfície, propriedades de racionalização construtiva e alto desempenho estrutural.

Figura 1: Vistas aéreas e análise geométrica do Aeroporto de Beijing, de Foster & Partners.



Fonte: Na primeira linha, Burry & Burry (2010) e Google Earth; Na segunda linha, Pottmann et al (2008); elaboração própria; e Burry & Burry (2010).

A obra se constitui por uma porção, um recorte, de tal superfície, ilustrado a direita da segunda linha da Figura 1, que pode ser descrita a partir da varredura de um arco de circunferência ao longo de outro arco de circunferência. Devido à curva da trajetória, a diretriz, estar em posição contrária aos arcos que são curvas geratrizes (imagem ao centro da segunda linha da Figura 1), conforma uma superfície de dupla curvatura, conforme a imagem a esquerda da segunda linha da Figura 1, o que lhe confere maior desempenho frente aos esforços e economia de material. De acordo com Burry e Burry (2010), estas particularidades de desempenho atribuídas a esta porção da superfície tórica são relevantes para a solução do projeto devido a dimensão do aeroporto, que tem quase 1 km de uma extremidade a outra.

A partir da análise da geometria, foram produzidos exercícios de representação que detalham os procedimentos geométricos para a obtenção da porção do toro adotada na configuração formal do projeto. A coluna 1 do Quadro 1 ilustra o tipo de informação e representações que acompanham o discurso didático sobre a obra em questão.

4.2. O Caso do Projeto Disney Concert Hall, de Frank Gehry

A geometria associada ao projeto Disney Concert Hall, de Frank Gehry, Figura 2, emprega uma variedade de superfícies descritas por linhas retas (superfícies retilíneas ou regradas) que se apoiam em curvas planas e espaciais. Com isto, seu autor cria um vocabulário diversificado de superfícies, desde as cilíndricas, passando pelas cônicas e tira partido das retilíneas não planificáveis, em sua maioria cilindroides, de acordo com a classificação de Monge, sistematizada em Rodrigues (1960).

Figura 2: Vistas do Disney Concert Hall, de Gehry & Partners.



Fonte: Burry & Burry (2010).

O arquiteto cria um projeto extremamente complexo, mas em que suas superfícies podem ser mapeadas porção a porção, a partir do estudo da classe de superfícies curvas. Além disso, tais superfícies, segundo Sheldon (2002), se caracterizam por uma taxonomia abrangente, em que é possível compreender que as retilíneas planificáveis (cilíndricas e cônicas) são restritivas frente à proposta das formas de Gehry, mas que encontra soluções mais flexíveis para tais formas nas superfícies retilíneas não planificáveis e que ainda podem ser construídas em materiais em chapa, devido ao coeficiente de deformação do material metálico de revestimento que foi empregado no projeto.

Este projeto destaca a racionalidade do tipo de superfície, por poder ser descrita a partir de linhas retas e construída em materiais que possuem comportamento semelhante ao do papel, o que facilita sua inserção no ensino de arquitetura.

A coluna 2 do Quadro 1 ilustra as representações desenvolvidas a partir da análise da geometria que acompanham o discurso didático sobre a obra em questão.

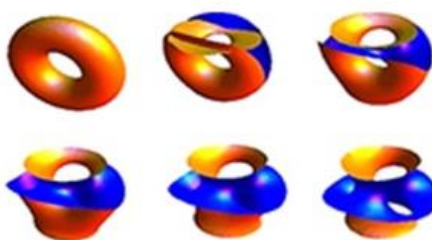
4.3. O Caso do Projeto do Centro de Tratamento de Animais Nativos da Austrália, de Minifie Nixon

O projeto do Centro de Tratamento de Animais Nativos da Austrália, Figura 3, oportunizou abordar o conceito de superfície mínima, pouco difundida no contexto formativo que se insere este estudo. Este tipo de superfície é o que conforma o átrio central da obra. Ela foi encontrada matematicamente no século XX, por Celso Costa, um pesquisador, matemático, brasileiro. O encontro desta superfície deu um impulso à teoria das superfícies mínimas, devido às particularidades de sua descrição, a partir de transformações topológicas em um toro, o mesmo tipo de superfície do primeiro projeto exemplificado.

Figura 3: Vistas do Centro de Tratamento de Animais Nativos da Austrália, Austrália, de Minifie Nixon.



Superfície mínima de Costa



Fonte: Burry & Burry (2010) e <https://victorcdt.wordpress.com/2013/09/08/12/>

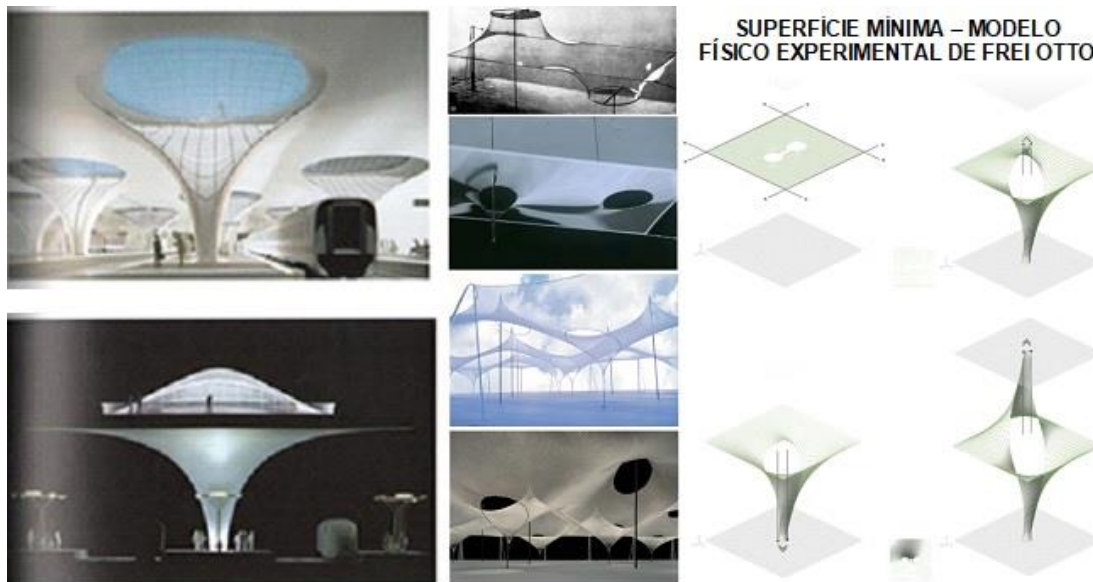
As qualidades de este tipo de superfície referem-se ao seu equilíbrio estável, que minimiza os esforços sendo considerado de energia zero, o que é relevante ao contexto da arquitetura sustentável e regenerativa. As superfícies mínimas são encontradas em muitos organismos vivos. No projeto, segundo Burry & Burry (2010) sua função vai além de ser uma cobertura de um espaço central, pois tem um carácter mais simbólico, ao remeter a forma de uma válvula cardíaca e, ao mesmo tempo, destacar o pátio que é o lugar de projeção dos procedimentos do centro. Minifie (2010) destaca o uso desta superfície como uma técnica de design.

4.4. O Caso do Projeto da Estação de Trem de Stuttgart (Main Station Stuttgart), de Ingenhoven Architects

O quarto projeto utiliza uma superfície mínima que foi encontrada fisicamente, a partir de modelos de corrente suspensa sob a ação da gravidade e de pesos, tal como nos projetos e obras de Gaudi e Frei Otto no século XX, Figura 4. A superfície mínima da obra provém de um modelo experimental do arquiteto Frei Otto desenvolvido no Instituto de Estruturas Leves de Stuttgart em 1960 e para o projeto da estação de trem foi refinada com técnicas de cálculo por elementos finitos (BURRY & BURRY, 2010). Este tipo de superfície pode ser configurado com espessura de 1/100 de seu vão livre, exatamente por suas qualidades de superfície mínima e equilíbrio estável, o que resulta em alta economia de material.

A superfície de referência tem o formato semelhante a um funil e a sua parte superior é limitada por um polígono hexagonal, formando um módulo, o qual, para configurar a obra, é repetido em simetria de translação, nos eixos X e Y. Identificou-se que este mesmo modelo tem sido utilizado em uma variedade de projetos contemporâneos recentes com superfícies contínuas, provavelmente pela forma inusitada e performativa que combina pilar e cobertura em uma única superfície mínima.

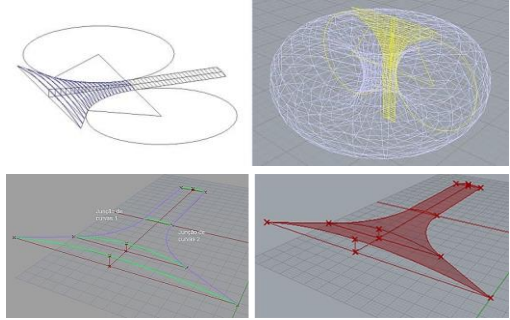
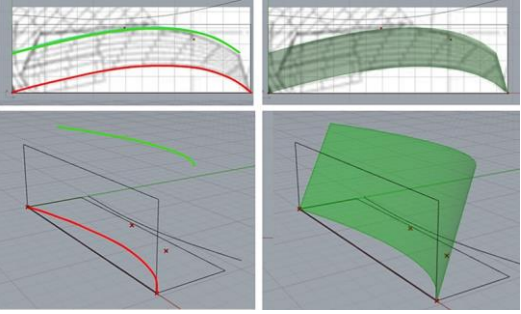
Figura 4: Vistas da Estação de Trem de Stuttgart, de Ingenhoven Architects e modelo físico de Frei Otto.

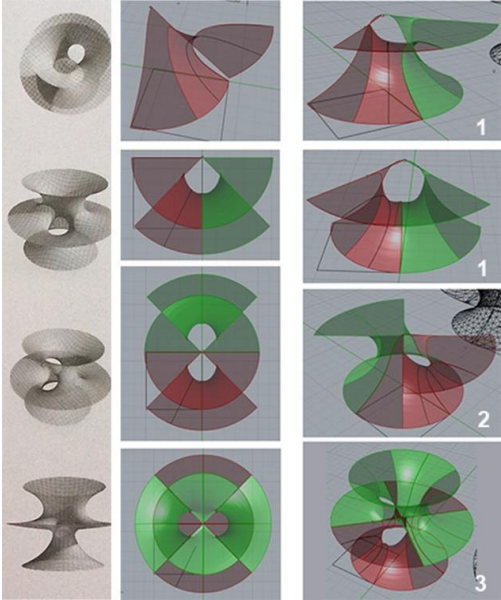
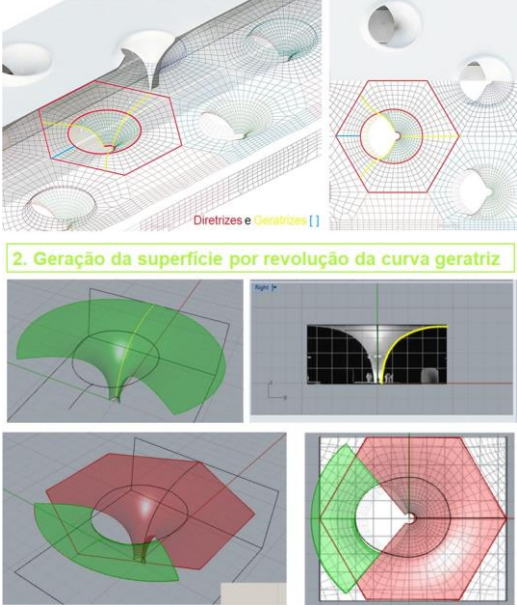


Fonte: Burry & Burry (2010) e https://parametricsemiology.wordpress.com/2013/10/17/grp_06-session_01/

O Quadro 01 sistematiza o estudo relativo aos quatro casos relatados, abrangendo imagens e descrições da geometria e a representação gráfica digital, incluindo-se os atributos arquitetônicos.

Quadro 1: Síntese da estrutura de saber das obras de referência investigadas (2014-18).

Projeto	Geometria	Representação	Atributos
1: Aeroporto de Beijing, Foster and Partners	Porção de um toro, gerada por varredura de curvas circulares ao longo de um caminho circular. Superfície com dupla curvatura.	 <p>Imagens: Pires (2018).</p>	Otimização estrutural Racionalidade construtiva
2: Disney Concert Hall Frank Gehry	Superfícies retilíneas planificáveis e não planificáveis geradas pela varredura de linhas retas ao longo de curvas De curvatura nula e		Construída com materiais em chapa - Flexibilidade para a criação de formas, mas rigorosamente reguladas por linhas retas.

Projeto	Geometria	Representação	Atributos
	dupla curvatura.	Imagens: Pires (2018).	
3: Australian Wildlife Health Centre Minifie Nixon	Superfície mínima de Costa (1982). Definida por transformações topológicas em um toro. Superfície de dupla curvatura e curvatura média nula em todos os seus pontos.	 <p>Imagens: Burry & Burry (2010) e Pires (2018).</p>	Minimização dos esforços na estrutura Geometria relacionada com estruturas da natureza Apelo visual
4: Main Station Stuttgart Ingenhoven Architects	Superfície mínima e modelo físico de Frei Otto (séc. XX). Possui dupla curvatura e curvatura média nula em todos os seus pontos.	 <p>Imagens: Pires (2018).</p>	Alto desempenho estrutural e definida a partir de modelos físicos e modelagem digital por simulação dos esforços atuantes (form-finding).

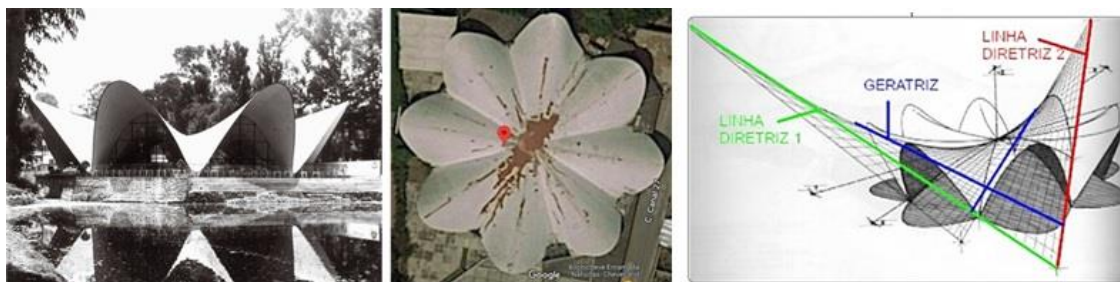
Fonte: Elaboração própria.

O segundo grupo de obras se refere aos estudos desenvolvidos no contexto do projeto de pesquisa, em atividades de iniciação científica. Eles integram as obras: Restaurante Los Manantiales, de Felix Candela, e o Hypérions, de Vincent Callebaut.

4.5. O Caso do Projeto do Restaurante Los Manantiales, no México, de Félix Candela

Este caso foi selecionado no âmbito das primeiras atividades do AMPARA, com a pesquisa de iniciação científica a qual partiu de uma revisão de literatura sobre o tema biomimética associado à caracterização de tipos de concepção arquitetônica tectônica e estereotômica, visando compreender as relações entre estas duas abordagens, a partir dos estudos de Lobach (2000) e Baeza (2003). O primeiro autor traça relações entre o comportamento evolutivo da natureza pela seleção natural de Charles Darwin e o processo de projeto, caracterizando as fases em que ambos se desenvolvem. A partir dos estudos de casos apresentados em Santos (2010) e Rebello (2000), em que a Biomimética atuou como precursora de soluções arquitetônicas, foi possível compreender tais conceitos aplicados diretamente na arquitetura e como podem contribuir a atividade em atelier (AUTORA e AUTORA, 2021). Os autores estudados traçavam uma relação entre obras de arquitetura e os conceitos de biomimética e arquitetura estereotômica, a partir de exemplos de projetos referenciais, tal como o Restaurante Los Manantiales, de Félix Candela.

Figura 5: Vistas frontal e aérea e análise geométrica do Restaurante Los Manantiales, de Felix Candela.



Fonte: : [Restaurante Los Manantiales - Urbipedia - Archivo de Arquitectura](#), Google Maps e elaboração própria.

Em tais estudos este projeto foi caracterizado como sendo de uma superfície em casca, tal como as conchas marinhas, configurado por uma composição em rotação de partes de paraboloides hiperbólicos, superfície de dupla curvatura gerada por retas reversas, de acordo com a geometria descritiva. Esta superfície possui qualidades de otimização estrutural aos esforços de compressão e é utilizada na arquitetura em estruturas de cascas de concreto de pequena espessura. De acordo com Baeza (2003) é um exemplo de projeto estereotômico, ou seja, estrutura maciça com um sistema estrutural contínuo. Embora o autor associe este tipo de arquitetura com uma estrutura pesada, pode-se identificar que as cascas em paraboloides hiperbólicos, devido as suas qualidades estruturais e pequena espessura na construção, apresentam-se muito leves e até mesmo delicadas e plásticas.

4.6. O Caso do Projeto Hypérions, na Índia, de Vincent Callebaut

O sexto caso de estudo foi desenvolvido também no âmbito da iniciação científica, em 2021-22, a partir do interesse em investigar o tema da arquitetura regenerativa. Este projeto foi concebido nesta abordagem, sendo sua estrutura responsável pelas condições ideais do sistema de ventilação, com qualidades estruturais na superfície do catenoide (Figura 6). A forma oferece equilíbrio ideal entre diâmetro e altura, evitando riscos de possíveis desmoronamentos (UDIIT; NAGARANI; HARIHARAN, 2018). Por ser uma superfície mínima, possui características de dimensionamentos pré-definidos em zero, mantendo-se inalterada – quase que – independentemente das possibilidades de design.

O arquiteto define explicitamente a relação deste projeto com a arquitetura regenerativa, principalmente pela propriedade da superfície mínima de minimizar os esforços e ser de energia zero, conforme as estruturas que se conformam na natureza.

Figura 6: Vistas do Hypérions de Vincent Callebaut e processo de geração do catenoide



Fonte: Wang (2016) e elaboração própria.

No Quadro 02 apresenta-se o mesmo tipo de estrutura de saber do Quadro 01, agora para os dois projetos que foram relacionados às abordagens da biomimética, esteriotômica e arquitetura regenerativa.

Quadro 2: Estrutura de saber das obras de arquitetura reconhecidas na pesquisa de iniciação científica, no período 2020-22.

PROJETO	GEOMETRIA	REPRESENTAÇÃO	ATRIBUTOS
<p>5: Restaura- te Los Manatiales Félix Candela</p>	<p>Composição de porções de um paraboide hiperbólico, gerado por varredura de linhas retas apoiadas em retas reversas que são as diretrizes da superfície. Superfície com dupla curvatura.</p>	<p>Fonte: Oliveira e Pires (2021).</p>	<p>Otimização estrutural e economia de material Qualidades de arquitetura esteriotômica Aumento da rigidez e é resistente aos esforços de compressão, como ocorre nas conchas marinhas.</p>

PROJETO	GEOMETRIA	REPRESENTAÇÃO	ATRIBUTOS
6: Hypérions Vincent Callebaut	Catenoide, superfície mínima gerada por revolução da curva catenária em torno de um eixo externo a curva. Superfície com dupla curvatura.	<p>Catenoide inicial Rotação Seções horizontais</p> <p>Catenoide final Reflexão Translação</p> <p>Fonte: Paixão e Pires (2022).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Superfície de energia zero. - Equilíbrio estável segundo Carmo (1987). - Resistente aos ventos devido a sua estrutura de auto contraventamento.

Fonte: Elaboração própria.

5. Considerações Finais

O projeto tem alcançado algumas metas previamente estabelecidas, como o reconhecimento das potencialidades do emprego de geometrias complexas na arquitetura associadas ao desenho paramétrico para a prática de arquitetura, a partir de um conjunto de estruturas de saber que destacam a necessidade de compreender o desempenho estrutural, estético, de eficiência energética e/ou de diversas ordens que justificam tais complexidades construtivas.

Os discursos didáticos, por meio de estruturas de saber a serem veiculadas nos processos formativos de arquitetura, devem contribuir ao reconhecimento da aplicabilidade e importância da geometria na arquitetura contemporânea, destacadamente por estar estritamente relacionada aos aspectos de sustentabilidade na arquitetura.

O projeto (omitido para avaliação as cegas) tem um compromisso de contribuir para a prática docente, em especial para constituir estruturas de saber que explicitem o diálogo entre as diferentes abordagens que constituem a complexidade da ação projetual, as quais a partir da parametria podem ser abarcadas de maneira integrativa.

Para a sequência do projeto, estão sendo desenvolvidas atividades de modelagem paramétrica que ampliam a integração entre geometria e estrutura, abarcando também as questões de desempenho frente ao conforto ambiental, abordagem que se trata de maneira racional no processo construtivo, contribuirá de maneira significativa para a problemática ambiental.

Agradecimentos

Agradecemos ao apoio financeiro das agências de fomento CNPq e FAPERGS, por meio de bolsas de iniciação científica dada por ambas as instituições (2020, 2021, 2022 e 2023) e recursos via edital recém-doutor 2021 – FAPERGS.

Referências

- BAEZA, Alberto Campo. **De la cueva a la cabaña. Sobre lo estereotómico y lo tectónico em arquitetura.** In: BAEZA, Alberto C. Sustancia y circunstancia: memoria del curso 2002-2003 de las asignaturas proyectos arquitectónicos 4 e 5. Madrid: Maireia Libros, 2003.
- BAPER, Salahaddin Yasin; KHAYAT, Mahmood.; HASAN, Lana. Towards Regenerative Architecture: Material Effectiveness. **International Journal of Technology**, 2020.
- BARRIOS HERNANDEZ, Carlos R. Design procedures: a computational framework for parametric design and complex shapes in architecture. Thesis (Ph. D.) - Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2006. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/35507>> Acesso em: 31 de maio de 2018.
- BERTOL, Daniela. **FORM GEOMETRY STRUCTURE: from nature to design.** Exton, Pennsylvania: Bentley Institute Press, 2011.
- BURRY, Jane; BURRY, Mark. **The New Mathematics of Architecture.** London: Thames e Hudson, 2010.
- CARMO, Manfredo Perdigão do. **Superfícies Mínimas.** Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA, 1987.
- CHEVALLARD, Yves. **La Transposición didáctica. Del saber sabio al saber enseñado.** Buenos Aires: Aique Grupo Editor, 2013. 3ª ed. 4ª reimp. Título original: La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné. Grenoble: Pensée Sauvage, 1991. 2ème édition.
- _____. 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. (Traducción de Ricardo Barroso, Universidad de Sevilla). Disponível em: <<http://www.aloj.us.es/rbarroso/Pruebas/CHEVALLARD.PDF>>
- CHILTON, John; MACDONALD, Angus; PEDRESCHI, Remo. **The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture: Heinz Isler.** London: Thomas Telford Press, 2000.
- CHILTON, John; CHUNG, Chu-Chun. Rooted in Nature: Aesthetics, Geometry and Structure in the Shells of Heinz Isler. **Nexus Network Journal**, v. 19, issue 3, pp. 763-785, 2017.
- DIAS, Bruno Duarte. BEYOND SUSTAINABILITY: BIOPHILIC AND REGENERATIVE DESIGN IN ARCHITECTURE. **European Scientific Journal**, Portugal, p. 147-158, 13 mar. 2015.
- FERNANDEZ, José Luis Ruiz. **Superfícies Regladas y Minimales.** 2010. Disponível em: <<http://masquemates.blogspot.com.br/2010/06/superficies-regladas-y-minimales.html>> Acesso em: julho de 2012.
- GONÇALVES, Joana Carla Soares; DUARTE, Denise Helena Silva. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, 14 dez. 2006. Ambiente Construído, p. 51-81. Disponível em:

<https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3720/2071>. Acesso em: 15 abr. 2022

HERNANDEZ, Carlos Roberto Barrios. Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. **Design Studies**. v. 27, n. 3, p. 309-324, 2006.

HOLANDA, Virgínia Célia Cavalcante de. Urbanização brasileira: um olhar pelos interstícios das configurações espaciais seletivas. In: FREITAS, N. A.; MARIA JÚNIOR, M.; HOLANDA, V. C.C. **Múltiplos olhares sobre a cidade e o urbano: Sobral e Região em Foco**. Sobral: UECE, 2010, p. 253-272. Disponível em: <https://fundacaosintaf.org.br/arquivos/File/ARTIGOS/ARTIGO%20DE%20vIRGNIA.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2022.

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

KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. New York: Spon Press, 2003.

LITTMAN, Jacob Alexander. Regenerative Architecture: A Pathway Beyond Sustainability. **Dissertação de Mestrado**. 2009. University of Massachusetts – Amherst. 68 p. Disponível em: <[Regenerative Architecture: A Pathway Beyond Sustainability](#)> Acesso em: abril 2015

LOBÄCH, Bernd. **Design industrial: bases para a configuração de produtos industriais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

LORENZI, Marcella Giulia; FRANCAVIGLIA, Mauro. ART & MATHEMATICS IN ANTONI GAUDÍ'S ARCHITECTURE: "LA SAGRADA FAMÍLIA". **Aplimat – Journal of Applied Mathematics**, volume 3, n.1, p. 125 – 146. 2010

MINIFIE, Paul. Design Domains: THEIR RELATIONS AND TRANSFORMATIONS AS REVEALED THROUGH THE PRACTICE OF PAUL MINIFIE. **Tese de Doutorado**. 2010. Doctor of Philosophy, RMIT University (School of Architecture and Design). Disponível em: <<https://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:160677/Minifie.pdf>> Acesso: fevereiro de 2018.

NIGUDKAR, Shravani. Regenerative Sustainable Design. In: NIGUDKAR, Shravani. Regenerative Sustainable Design. [S. l.], 2020. Disponível em: <<https://www.re-thinkingthefuture.com/sustainable-architecture/a6024-regenerative-sustainable-design/>>. Acesso em: 4 maio 2022

OLIVEIRA, Brunna Pereira.; PIRES, Janice de Freitas. BIOMIMÉTICA E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA: ABORDAGEM INTEGRADA AO PROCESSO PROJETUAL EM ARQUITETURA. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S. l.], v. 10, p. 180–192, 2021. DOI: 10.19177/rgsa.v10e02021180-192. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/10575 Acesso em: 16 abr. 2023.

OLIVEIRA, Brunna Pereira; PIRES, Janice de Freitas. BIOMIMÉTICA, GEOMETRIA COMPLEXA E MODELAGEM PARAMÉTRICA: UMA ESTRUTURA DE SABER PARA ARQUITETURA. **MIX Sustentável**, [S. l.], v. 8, n. 5, p. 63–73, 2022. DOI: 10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n5.63-73.

Disponível em: <<https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/5597>> Acesso em: 16 abr. 2023.

OTTO, Fei. (1981). **Natural Building**. Alemanha: Institut für leichte Flächentragwerke.

PAIXÃO, Letícia Pereira; PIRES, Janice de Freitas. A Geometria Complexa da Arquitetura em uma Abordagem Regenerativa. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, [S. l.], v. 10, n. 27, 2022. DOI: 10.17271/23178604102720223246. Disponível em:

https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/cidades_verdes/article/view/3246

Acesso em: 16 abr. 2023.

PEREZ-GARCIA, Agustín.; GÓMEZ-MARTÍNEZ, Fernando. Natural structures: strategies for geometric and morphological optimization. **Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium**, Valencia Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures 28 September – 2 October 2009, Universidad Politecnica de Valencia, Spain. 2009. Alberto DOMINGO and Carlos LAZARO (eds.)

PIRES, Janice de Freitas; SILVEIRA, Carlos Eduardo; FIALHO, F. A. P. Arquitetura regenerativa: o ensino e aprendizagem para uma nova concepção em arquitetura. *Travessias*, Cascavel, v. 10, n. 2, p. 14–34, 2016. Disponível em:

<https://e_revista.unioeste.br/index.php/travessias/article/view/12452>. Acesso em: fev. 2022.

PIRES, Janice de Freitas. A Constituição de uma Rede de Conceitos da Geometria Complexa da Arquitetura Contemporânea: das teorias a modelagem paramétrica das superfícies. **Tese de Doutorado**. 2018. Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina (Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo – POSARQ).

PIRES, Janice de Freitas; PEREIRA, Alice Cybis. El modelado paramétrico de la geometría compleja del Aeropuerto Internacional de Beijing: un estudio de transposición didáctica para arquitectura. **REVISTA CIENCIA E TECNOLOGIA**, v. 30, p. 69-85, 2018.

PIRES, Janice de Freitas; PEREIRA, Alice Cybis. Estruturação do Saber para o Reconhecimento das Superfícies Complexas da obra Disney Concert Hall. **DESIGN E TECNOLOGIA**, v. 9, p. 29-42, 2019.

PIRES, Janice de Freitas; PEREIRA, Alice Cybis. A estruturação do saber relacionado a geometria complexa e a modelagem paramétrica de estruturas regenerativas na arquitetura. **GESTÃO & TECNOLOGIA DE PROJETOS**, v. 14, p. 90-110, 2019.

PIRES, Janice de Freitas; PEREIRA, Alice Cybis. Entre las curvas de la arquitectura contemporánea y la enseñanza de la geometría en arquitectura: un enfoque didáctico del diseño paramétrico. **REVISTA CIENCIA E TECNOLOGIA**, p. 63-75, 2020.

POTTMANN, Helmut. ASPERL, Andreas. HOFER, Michael; KILIAN, Axel. **Architectural Geometry**. Exton, Pennsylvania: Bentley Institute Press, 2007, 1ª ed.

REBELLO, Yopanan. **A Concepção Estrutural e a Arquitetura**. 1ª Edição. São Paulo: Zigurate Editora, 2000.

RIPPMANN, Matthias. BLOCK, Philippe. Funicular Shell Design Exploration. **ACADIA 2013**, ADAPTIVE ARCHITECTURE. 2013

RODRIGUES, Álvaro. **Geometria Descritiva: Projetividades, Curvas e Superfícies**. 1a ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico Ltda, 1960.

SANTOS, Claudemilson dos. O Desenho como Processo de Aplicação da Biomimética na Arquitetura E No Design. **Revista Tópos**. Presidente Prudente: UNESP, v. 4, n. 2, p. 144 – 192. 2010.

SHELDEN, Dennis R. Digital Surface Representation and the Constructibility of Gehry's Architecture. 2002. **Thesis (Ph. D.)**. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/16899>>

UDIIT, S. P. A.; NAGARANI, DR. S.; HARIHARAN, A. Catenary Curves –A case study. International Journal of Management, Technology and Engineering, v. 8, n. 12, p. 644-649, 2018.

WANG, Lucy. **Urban farming utopia in India**. 2016. Disponível em: [Urban farming utopia in India produces more energy than it uses \(inhabitat.com\)](https://www.inhabitat.com) Acesso em: 15 abril 2022.