

A Geometria Complexa da Arquitetura em uma Abordagem Regenerativa

The Complex Geometry of Architecture in a Regenerative Approach

La Geometría Compleja de la Arquitectura en un Enfoque Regenerativo

Letícia Pereira Paixão

Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, UFPel, Brasil
leticia.p.paixao@hotmail.com

Janice de Freitas Pires

Professora Doutora, UFPel, Brasil
janicepires@gmail.com

RESUMO

Este artigo vincula-se ao Projeto de Pesquisa AMPARA (Análise, Modelagem PARAMétrica e Fabricação Digital da geometria complexa da arquitetura: construção de referenciais didáticos para o ensino de projeto), da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAUrb) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). Sob tal ótica relaciona-se o emprego de técnicas de representação gráfica digital, particularmente a modelagem paramétrica, alinhadas ao enfoque da Arquitetura Regenerativa como fonte de exploração de tais geometrias no projeto de arquitetura, a partir de sua metodologia projetual, que tem por objetivo potencializar o saber relativo à ação de projetar baseado em sistemas vivos naturais. O estudo é desenvolvido por meio da análise e representação de um projeto referencial, configurado com uma geometria complexa associada a princípios de regeneração. Busca-se explicitar o saber subjacente a este projeto, com base em autores de referência e no desenvolvimento de representações paramétricas associadas a análises da geometria, a fim subsidiar processos formativos em arquitetura.

PALAVRAS-CHAVE: Arquitetura Regenerativa. Modelagem Paramétrica. Geometria Complexa.

ABSTRACT

This article is linked to the AMPARA Research Project (Analysis, PARAMetric Modeling and Digital Fabrication of the complex geometry of architecture: construction of didactic references for teaching design), of the Faculty of Architecture and Urbanism (FAUrb) of the Federal University of Pelotas (UFPel). From this perspective, the use of digital graphic representation techniques is related, particularly parametric modeling, aligned with the approach of Regenerative Architecture as a source of exploration of such geometries in architectural design, from its design methodology, which aims to enhance knowledge related to the action of designing based on natural living systems. The study is developed through the analysis and representation of a referential design, configured with a complex geometry associated with regeneration principles. We seek to explain the knowledge underlying this project, based on reference authors and on the development of parametric representations associated with geometry analysis, in order to support formative processes in architecture.

KEYWORDS: Regenerative Architecture. Parametric Modeling. Complex Geometry.

RESUMEN

Este artículo está vinculado al Proyecto de Investigación AMPARA (Análisis, Modelado PARAMétrico y Fabricación Digital de la geometría compleja de la arquitectura: construcción de referentes didáticos para la enseñanza del diseño), de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAUrb) de la Universidad Federal de Pelotas (UFPel). Desde esta perspectiva, se relaciona el uso de técnicas de representación gráfica digital, particularmente el modelado paramétrico, alineado con el enfoque de la Arquitectura Regenerativa como fuente de exploración de dichas geometrías en el diseño arquitectónico, a partir de su metodología de diseño, que pretende potenciar los conocimientos relacionados con la acción de diseñar a partir de sistemas vivos naturales. El estudio se desarrolla a través del análisis y representación de un diseño referencial, configurado con una geometría compleja asociada a principios de regeneración. Buscamos explicar los conocimientos que subyacen a este proyecto, a partir de autores de referencia y el desarrollo de representaciones paramétricas asociadas al análisis de la geometría, con el fin de apoyar los procesos formativos en arquitectura.

PALABRAS CLAVE: Arquitectura Regenerativa. Modelado Paramétrico. Geometría Compleja.

1 INTRODUÇÃO

O artigo vincula-se ao Projeto de Pesquisa AMPARA (Análise, Modelagem PARAMétrica e Fabricação Digital da geometria complexa da arquitetura: construção de referenciais didáticos para o ensino de projeto), da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAUrb) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). O projeto objetiva a análise do emprego de superfícies complexas na arquitetura contemporânea, bem como a construção de referenciais no que tange as técnicas necessárias de representação e fabricação digital a fim de criar aporte ao ato de projetar.

Atrela-se a premissa do projeto o conceito de Arquitetura Regenerativa, articulada sob o caráter evolutivo da arquitetura bioclimática, que se apresenta como uma maneira de explorar e analisar geometrias complexas, devido a tendência desta abordagem de design em basear-se em sistemas vivos; bem como seus processos e necessidades por trás do desenvolvimento da forma.

Ao longo dos anos, evidencia-se a necessidade de mudança na maneira de pensar projeto e a insuficiência da arquitetura bioclimática no que tangem questões ambientais, visto que, apesar de sua importância e caráter evolutivo ao longo da história, o tema sofreu uma banalização internacional a partir da Segunda Guerra Mundial (GONÇALVES; DUARTE, 2006). O descrédito caminhou paralelamente ao imaginário de que as novas tecnologias desenvolvidas podiam oferecer total controle às condições climáticas de edifícios, acarretando no 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 e o processo de crescimento econômico desenfreado, que desencadeou uma série de eventos catastróficos no meio ambiente dado o caráter exploratório de recursos naturais. A urbanização acelerada e orientada por interesses do mercado imobiliário foi precursora do processo de exclusão social, em que a população mais vulnerável, vítima de um sistema excludente, passa a desmatar regiões de proteção ambiental pela falta de alternativas de morar. Os fatores, quanto somados, transparecem 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 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 traça a necessidade de soluções diversas a um problema, bem como a atuação de edifícios como sistemas vivos; contendo em seus princípios fundação argumentativa da área da biomimética.

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, no que tange a 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 inspiradas ou replicas de padrões presentes na natureza, uma vez que há necessidade em pensar projeto de maneira otimizada as variações em busca da forma ideal.

Este trabalho procura investigar e explicitar, através do objeto de estudo Hyperions, de autoria do escritório Vicent Callebaut, as relações entre a geometria complexa utilizada (particularmente uma superfície mínima) e os desempenhos térmico e estrutural resultantes de sua configuração, dando ênfase ao saber da geometria, a fim de subsidiar o processo de representação gráfica paramétrica e a sua estruturação para a didática do projetar arquitetura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A arquitetura regenerativa e superfícies mínimas

A palavra regenerativa tem origem no inglês e segundo o “American Heritage Dictionary of the English Language” significa: dar nova vida ou energia a algo; renovar a existência; formar, construir ou criar algo novamente em estado melhorado; melhora de local ou sistema, especialmente quando de maneira ativa e de sucesso (ATTIA, 2017).

A arquitetura regenerativa está atrelada ao design regenerativo; considerados um só campo de estudo; e compreende o emprego de tecnologias não como forma de redução ou conservação de impactos ambientais, mas no desenvolvimento de sistemas vivos ou edifícios que se enquadrem no conceito de “artificialmente naturais” (LITTMAN, 2009), visto que ainda alteram e demandam uma série de elementos.

A crise ambiental que urge através dos anos apresenta-se apoiada sobre pilares econômicos e políticos, dado a eminente fim da energia fóssil e demais recursos naturais (ATTIA, 2017). O arquiteto, portanto, pode ser colocado num dos centros desta discussão, visto o impacto ambiental ao quais suas decisões são responsáveis. Entretanto, apesar de seu papel fundamental nas mudanças climáticas, algumas discussões devem ganhar maior evidência e arquitetos devem ser entendidos como uma chave para o sucesso ou não do impedimento (e reversão) dos impactos da crise climática.

Devem-se considerar as cidades e edifícios como micro comunicadores que incorporam o edifício com o local, sistemas, energia, construção, fauna, flora, lugar a fim de tornar a arquitetura como algo pertencente àquele lugar, funcionando como peça única. Tais considerações devem ser realizadas com o intuito de tornar o edifício regenerativo, ou seja, sua existência deve ser positiva (LITTMAN, 2009), para além de minimizar impactos.

O sistema vivo formado pelo fator regenerativo depende do equilíbrio, a edificação deve ser idealizada e executada para promover seu autossustento, contando com o apoio mútuo às partes que compõe os sistemas e todos eles devem satisfazer para além de uma necessidade, ou seja, para cada necessidade devem existir no mínimo duas soluções plenamente viáveis. Segundo Littman (2009) a arquitetura regenerativa deve idealizar o projetar e construir com vida e não simplesmente edificações “menos piores”.

Para além, o ato de projetar no que tange a arquitetura regenerativa inspira-se metodológica e geometricamente na natureza, em função de soluções de desempenho arquitetônico com fundação em princípios de otimização. Segundo PEREZ-GARCIA; GOMÉZ-MARTÍNEZ (2003), a natureza tende a desenvolver estruturas com soluções energéticas de longo prazo, de tal maneira a arquitetura traça linhas relacionais as superfícies mínimas, ou seja, é possível correlacionar o conceito de edifícios regenerativos as superfícies complexas da arquitetura, dada a necessidade de eficiência, otimização e funcionalidade exigida.

As superfícies mínimas são aquelas que possuem valor de curvatura média igual a zero em todos os seus pontos (CARMO, 1987) e incluem superfícies de área mínima, apesar de não ser exclusividade. Dentre as superfícies mínimas até então encontradas matematicamente incluem-se: Catenóide, Helicóide, Enneper, Superfície de Costa e uma infinidade de superfícies descritas nos séculos XIX e XX (CARMO, 1987; BURRY & BURRY, 2010), a partir do advento da representação paramétrica de Weierstrass.

Apesar da pluralidade das superfícies mínimas, o estudo investigará sobre o catenóide e conseqüentemente sua curva geratriz, a catenária, especialmente a sua adoção no projeto Hypérions de Vincent Callebaut. A palavra catenária tem sua etimologia do latim “catena”, que significa corrente; os primeiros registros matemáticos que se tem sobre a curva catenária foram documentados por Galileu Galilei, que a confundiu com uma parábola, entretanto, em 1669 Jungius invalidou a teoria, afirmando que a suposição de Galileu, apesar da semelhança, não correspondia à realidade. Todavia, apenas em 1691 tomou-se conhecimento de fato da curva e suas propriedades. No entanto, anteriormente a curva já havia sido empregada de maneira intuitiva na Mesopotâmia para conformar pontes e algumas coberturas de construções.

James Bernoulli, segundo estudos próprios, concluiu que apesar da semelhança a suposição de Galileu não correspondia à realidade. Todavia, apenas em 1691 houve confirmação acerca da curva por James Bernoulli, John Bernoulli, Leibniz e Huygens (UDIIT; NAGARANI; HARIHARAN, 2018).

O estudo de superfícies mínimas, bem como suas primeiras formulações, iniciara-se em 1760 por Joseph-Louis-Lagrange indagando acerca da necessidade de uma superfície de menor área para curva limite arbitraria; no século XIX, Plateau realizou estudos com películas de água com sabão, que formam superfícies mínimas envoltas em um contorno de metal deformável. É uma superfície de menor área para determinado contorno e seu principal atributo é seu equilíbrio estável (POTTMAN et al, 2007). Apenas 16 anos após os primeiros estudos de superfícies mínimas é que Jean Baptiste Meusnier evidencia a correlação entre as superfícies mínimas e sua curvatura média zero (CARMO, 1987).

A curva catenária segue este princípio de estabilidade e é formada devido à força do próprio peso sob uma “corrente flexível”. Devido a isto, a curva, ao girar em torno de um eixo externo a ela, gera uma superfície com os mesmos princípios estáveis (superfície mínima), ilustrada à direita da Figura 2. No entanto, nem todas as superfícies com curvas catenárias

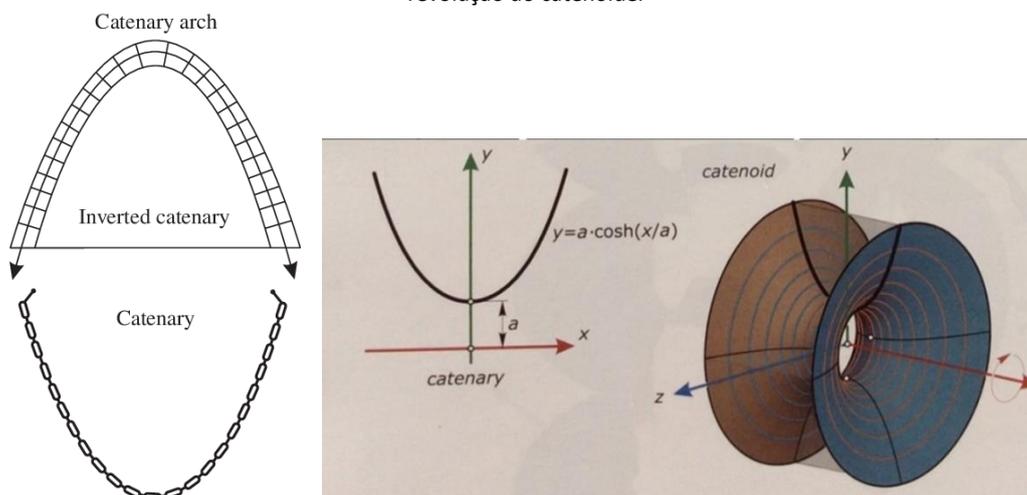
possuem estabilidade total, somente o catenoide de revolução atinge tal condição. A curva é utilizada na arquitetura a fim de proporcionar elementos com geometria curva que respondem a questões de otimização estrutural; Antoni Gaudí e Frei Otto são arquitetos considerados percussores na aplicação da curva na arquitetura (BURRY et al, 2010) explorando suas propriedades relacionadas a estabilidade e como meio de busca de formas no processo de projeto. A Figura 1 ilustra os modelos de catenárias de Antoni Gaudí para a Colónia Guell na Espanha. Em tais modelos, as catenárias são inicialmente utilizadas, mas após, em um processo iterativo, sofrem deformações por meio de pesos pendurados que correspondem com os esforços da estrutura a ser utilizada nas obras. De maneira geral, as superfícies mínimas possuem curvas diferentes das catenárias em sua geometria, embora possam ter alguma destas em sua estrutura, com exceção do catenoide de revolução, que possui somente catenárias como curvas da superfície (HUERTA, 2006).

Figura 1 – Modelos de catenárias sob o efeito de seu peso em correntes para A Cripta da Colónia Guell, por Antoni Gaudí.



Fonte: Pierre Dragicevic.

Figura 2 – À esquerda, arco catenária e arco catenária invertido; Curva catenária como geratriz de revolução do catenoide.



Fonte: Coll e Harrison (2014); Pottmann et al (2007).

A curva, após deformar sob a ação da gravidade, é feita invertida para gerar um arco em pura compressão, uma otimização estrutural para aplicações na arquitetura (Figura 2). Conforme já referido, esta mesma curva é a geratriz da superfície de revolução catenoide, visto a sua rotação em 360º em um eixo axial. O catenoide foi uma das primeiras superfícies mínimas encontradas matematicamente, no século XVIII. Seu emprego na arquitetura dá-se em razão de sua habilidade de estabilidade estrutural, economia de material, harmonia com o ambiente

dada a maneira como é adquirida, ou seja, é uma geometria que se desenvolve espontaneamente a partir de princípios físicos, sendo então inspirada na natureza, bem como por sua estética.

3. METODOLOGIA

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica sobre arquitetura regenerativa e aplicações desta abordagem na arquitetura, a partir de LITTMAN (2009), PIRES; SILVEIRA; FIALHO (2016), NARDIN; VAGHETTI; ROMANO (2021), ATTIA (2017), visando compreender seus conceitos e propriedades e para possibilitar a identificação e seleção de referenciais arquitetônicos a serem explicitados.

Foram investigadas as soluções arquitetônicas aplicadas no projeto Hypérions, de Vicent Callebaut e como estas seguem os princípios de arquitetura regenerativa, inspirando-se em sistemas vivos, portanto, apoiados em concepções geométricas complexas; embora não incluído no escopo deste artigo, foram também investigados os conceitos que estruturaram os recursos termo acústicos e estruturais utilizados através de UDIIT; NAGARANI; HARIHARAN, (2018), FILZ; D'ANZA (2019), LIEW et al (2003), SILVA; OLIVEIRA; GONZAGA (2019), KORB; LINSENMAR (1999).

Ainda, foi desenvolvida uma modelagem paramétrica conceitual baseada na geometria da obra objetivando explicitar tais conceitos geométricos e, ao mesmo tempo, obter um modelo para análises estruturais e de conforto ambiental. Neste estudo, será abordada a etapa de explicitação dos conceitos do projeto e a modelagem paramétrica de sua geometria. Na sequência, será abordado o projeto Hypérions com intuito de evidenciar a maneira como se relaciona com a arquitetura regenerativa, a partir dos discursos encontrados sobre o projeto e com subsídios da modelagem paramétrica, visando sua representação para posteriores análises de desempenho a serem realizadas no desenvolvimento do AMPARA.

4 RESULTADOS

4.1 O projeto Hyperions (Vincent Callebaut)

O Hyperions, de concepção pelo escritório Vicent Callebaut Architectures, assim como outros projetos do arquiteto, incorpora o conceito de arquitetura regenerativa. Localizado em New Delhi, na Índia, a edificação – ainda não finalizada – contará com área total de 119.582m² dividida entre 18 torres onde cada unidade tem 85m² cada; totalizando 36 andares e 128,20m de altura, contando com as passarelas superiores com vista ao céu.

Segundo informações adquiridas no site do escritório sobre a obra, atribui-se a Índia 17,6% da população mundial e é o quarto maior produtor alimentar. Os desafios que se unem a densidade populacional e econômica carregam questões importantes acerca da maneira adequada de divisão do solo urbano e as consequências ambientais para a população, sobretudo a mais vulnerável.

O cliente responsável descreve suas crenças sobre o fim do crime de ecocídio em seu país, que sofre constantemente com a destruição de seus ecossistemas e, portanto, com a poluição, sendo a Índia considerada um dos países mais poluídos do mundo. A necessidade para

tal projeto seguindo o conceito regenerativo torna-se evidente visto o manto de poluição que cobre a New Delhi (THIAGARAJAN, 2022), bem como a presença constante de ondas de calor capazes de levar a morte; são consequências de desertificações de áreas antes produtivas e florestais, bem como a emissão veicular e industrial, são responsáveis pelo ar tóxico na cidade. O local preciso da construção será Jaypee, nova cidade localizada na capital, que, assim como o resto da cidade, está saturada com a poluição; a intenção por trás do projeto é tornar a cidade um espaço pioneiro no que tange a agroecologia urbana, dada a situação de infertilidade das terras na atualidade.

A edificação será realizada em madeira, um dos elementos de emprego mais antigo na construção civil, visto que é fonte renovável e natural e permite a redução da utilização de energia; ao contrário, por exemplo, de materiais como aço que necessitam de um processo de produção extremamente poluente. O local será responsável por produzir sua própria energia através de no mínimo duas soluções, sendo elas: a captação através de ventos que circulam o cinturão verde, produzindo eletricidade através das turbinas eólicas de eixo vertical; as torres contarão com placas fotovoltaicas e térmicas de cor azul que circundarão todas as torres seguindo o fluxo do sol. Os sensores solares serão responsáveis também por destacar painéis das varandas principais e cúpulas de vidro nas estufas bioclimáticas para garantir a produção constante de iluminação natural e artificial e o aquecimento de água para fins higiênicos; a água poupada, neste caso, pode chegar a 90%.

Figura 3 – O Projeto Hypérions



Fonte: Wang (2016)

Em relação à agropecuária, contará com pequenos plantios em cada unidade, com sistema próprio e adequado de irrigação, promovendo a agricultura vertical a fim de permitir a autonomia alimentar dos residentes. Quase que todas as salas e torres terão uso multifuncional e a área de moradia – entre apartamentos grandes e pequenos – terá alas estudantis que se abrirão para varandas hidropônicas. Os diversos usos e torres serão conectados por passarelas irrigadas por coleta de águas pluviais que convergem para um grande telhado de pomar.

Para além, Hyperions possuirá um sistema de ventilação natural baseado no controle climático de cupinzeiros. De clima subtropical onde predomina o calor e umidade, o sistema articulado inspira-se em princípios da biomimética, visto que reproduz o funcionamento de um sistema vivo. Os cupins são considerados exímios construtores, responsáveis pela abertura de túneis na construção de seus ninhos que arejam e melhoram a estrutura do solo de inserção. Cupinzeiros são formados por várias camadas de ventilação a fim de garantir uma temperatura

agradável do ar no interior, tendo cuidado e atenção para permitir a circulação de gases que devem ser expulsos de seu interior, ao mesmo tempo em que permitem a entrada de oxigênio; tendem a sugar o ar da parte mais baixa para em seguida subir por um túnel em direção ao seu topo, que recebe o nome de “chaminé de ar”, e laterais. O sistema, já conhecido por sua utilização em outras edificações, é responsável pelo controle e variação de temperatura quando comparado ao exterior de 3 a 5º; tendo função de arejar em dias mais quentes e aquecer em dias mais frios (SILVA; OLIVEIRA; GONZAGA, 2019).

O catenoide utilizado, característica estrutural da obra, é responsável pela boa aplicação quanto ao sistema de ventilação, mas também devido às qualidades estruturais da catenária e catenoide (Figura 4). 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; além disso, o catenoide, ao contrário do cilindro, é uma estrutura auto contraventada (FILZ; D’ANZA, 2011), ou seja, garante a estabilidade global do conjunto, pois sua geometria e estrutura em madeira funcionam como estabilizador (LONGO, 2022). O subsistema de contraventamento, neste caso, por conta da grande altura, depende de fatores de utilização geométrica.

4.2 Análise geométrica da superfície e modelagem paramétrica

Inicialmente, a partir da revisão de literatura, foi feita uma análise da geometria da obra (Figura 4), visando identificar suas geratrizes e diretrizes, assim como seu eixo para extrair o ângulo de inclinação do catenoide.

Figura 4 – À esquerda, o Hypériions visto de cima e à direita a análise da geometria do catenoide.

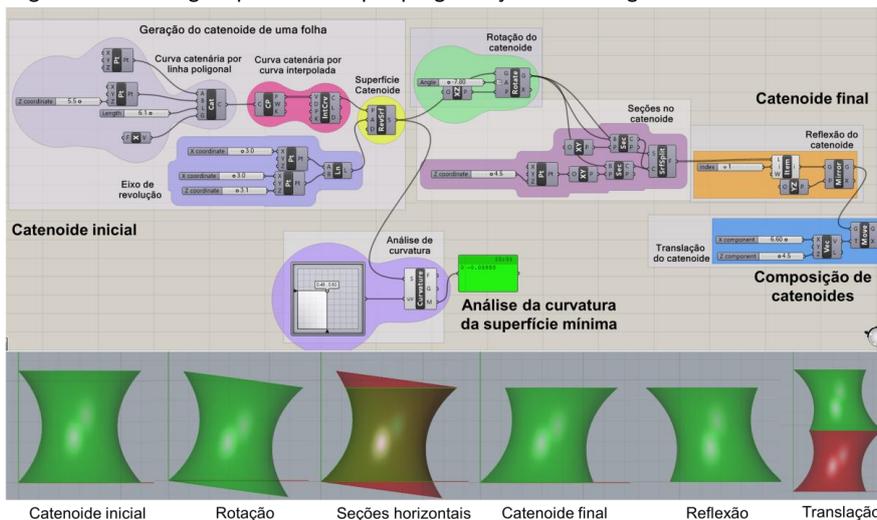


Fonte: à esquerda, Wang (2016); à direita, por elaboração própria.

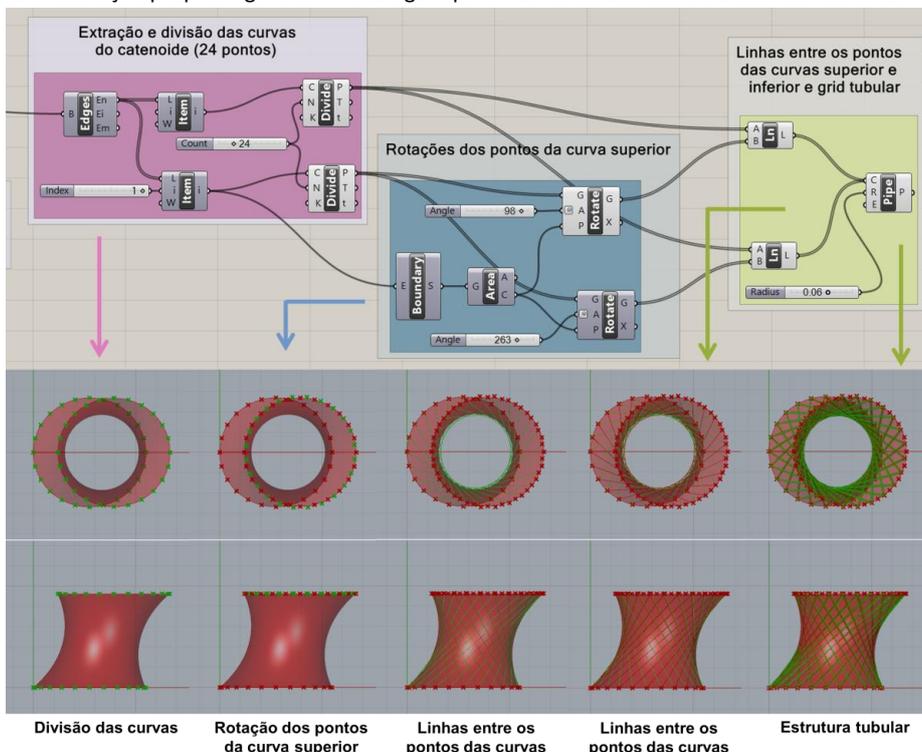
A modelagem paramétrica da geometria básica foi feita a partir da construção da curva catenária no eixo x, tendo-se definido seus parâmetros de distância entre os pontos inicial em final (dados pela coordenada Z dos pontos) e o comprimento total da curva, conforme a programação visual da Figura 5. Estes parâmetros foram ajustados ao longo da modelagem tendo-se por base a imagem de uma vista da obra, considerando-se a possibilidade de manipulação dinâmica para conformar a curva. Com a curva definida, representou-se um eixo vertical afastado da curva no eixo x e aplicou-se a técnica de revolução (revolution) para gerar o

catenoide. Na sequência, o catenoide foi inclinado com uma rotação no eixo XZ com ângulo de 7,8 graus. Após, foi seccionado na parte inferior e superior (base e topo) com planos horizontais e o catenoide final foi espelhado (reflexão) no plano YZ e movido em altura (eixo Z), a partir da transformação de translação, para compor o conjunto de dois catenoides da obra. Para a estrutura de auto contraventamento, definiu-se 24 pontos sobre as curvas diretrizes, inferior e superior (curvas ligeiramente elípticas), e traçaram-se linhas entre os pontos de tais curvas, em posição reversa. Por estas linhas, foram gerados tubos semelhantes à estrutura da obra, conforme a programação visual da Figura 6.

Figura 5 – Modelagem paramétrica por programação visual da geometria básica da obra.



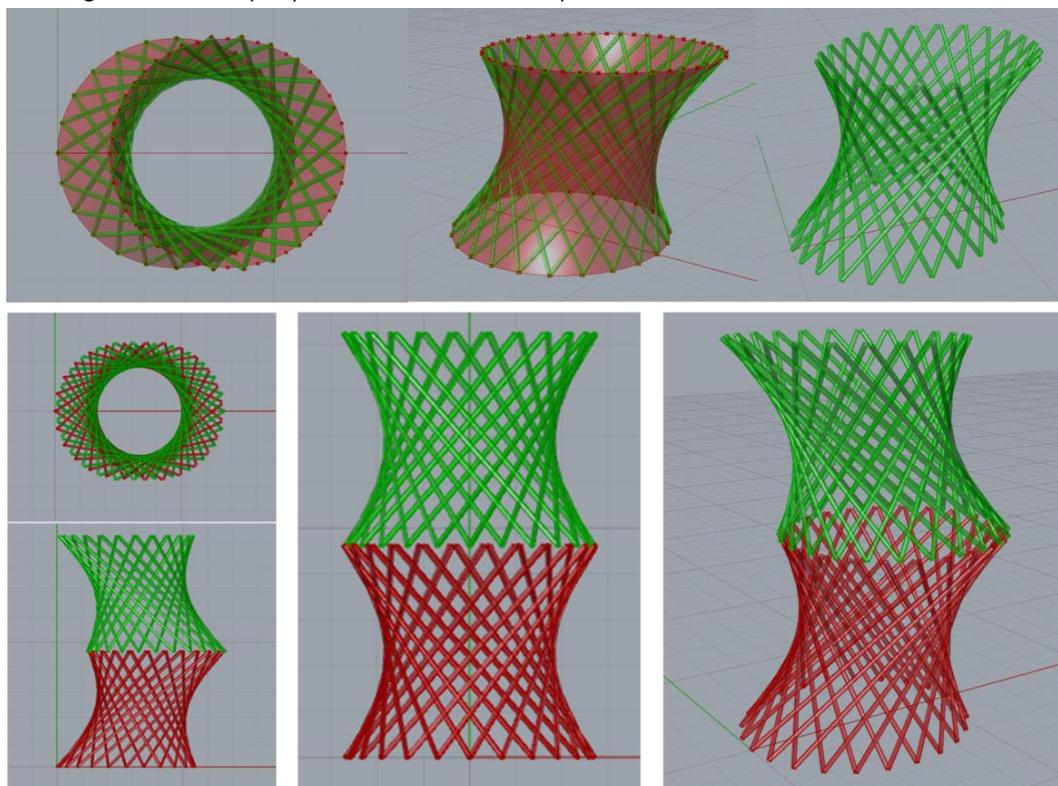
Fonte: Elaboração própria. Figura 6 – Modelagem paramétrica da estrutura de auto contraventamento.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 7 ilustra a estrutura da obra justaposta com a superfície e vistas ortográficas e perspectivas da estrutura de contraventamento dos dois catenoides da obra.

Figura 7 – Vistas e perspectivas dos modelos da superfície e sua estrutura de contraventamento.



Fonte: Elaboração própria.

Uma das questões mais específicas e importantes deste trabalho, relacionadas ao saber da geometria, refere-se ao fato da possibilidade de aproximar a superfície com a estrutura de contraventamento, fato que se for analisado isoladamente para a geometria do catenoide, existiria um impedimento, já que esta superfície não pode ser descrita pelo movimento de linhas retas. Esta descrição geométrica só é possível para um hiperboloide de revolução, geometria ligeiramente diferente do catenoide, sendo que a única superfície mínima totalmente descrita por linhas retas é um helicóide, segundo Carmo (1987). No entanto, um dos principais resultados deste estudo a partir da geometria e da parametria, foi a identificação de que é possível alcançar a mesma curvatura da catenária inclinada com esta estrutura em linhas retas. Isto possivelmente pela geometria estar em tal posição e os pontos de base das linhas estarem sobre as curvas de seção (que são inclinadas em relação ao catenoide original). Não se encontrou até o momento uma explicação matemática para tal fato, mas a partir da modelagem foi possível identificar tal possibilidade. Antes de este exercício, questionava-se como Callebaut teria usado em seu projeto um catenoide tendo este uma estrutura em linhas retas (algo impossível pelos conceitos matemáticos).

Os resultados obtidos ainda indicaram a utilização de princípios da arquitetura regenerativa como fator de suma importância no desempenho energético térmico do edifício, estes replicados através de geometrias complexas inspiradas na natureza que estruturam as formas finais utilizadas no projeto analisado.

As questões acerca do desempenho estrutural da geometria indicaram elemento decisivo, visto o poder que auto contraventamento apresenta quando exposto as cargas, característica vital em função da altura das torres e da ação do vento sobre elas.

5. CONCLUSÃO

Para além da sustentabilidade, tida atualmente como um termo insuficiente no que tange a arquitetura (LITTMAN, 2009), a arquitetura regenerativa objetiva agir como um sistema vivo, pois as edificações não devem comportar-se como plenamente consumidoras e sim como um sistema que se regenera, não só suprimindo à natureza com aquilo que consome, mas satisfazendo outros princípios energéticos e arquitetônicos de forma que produzam soluções concretas às necessidades presentes e futuras. A arquitetura regenerativa, portanto, pode ser considerada de desempenho energético negativo, pois deve produzir além do seu consumo e há a necessidade de mais de uma solução para as necessidades deste sistema. Em termos formais, tais princípios podem ser atingidos por geometrias de superfícies mínimas.

Alinha-se ao conceito supramencionado a utilização de geometrias complexas na arquitetura contemporânea, visto que se integra através do conceito de comunidades e sistemas presentes no universo que tendem naturalmente a complexidade geométrica.

O trabalho buscou então compreender e explicitar o saber geométrico e aquele relacionado à etapa de modelagem paramétrica que deve unir-se ao processo de projetar a fim de otimizar tais processos e a edificação em si, por meio de conformações geométricas que atendam as necessidades da edificação

Na continuidade da pesquisa, serão feitos estudos de desempenho estrutural e de conforto térmico da geometria aqui explicitada, comparativos com outros tipos de superfícies geométricas, a fim de corroborar e explicitar didaticamente suas qualidades construtivas.

6. Referências

A ONDA 'infernial' de calor na Índia: 'Tenho que trabalhar sob sol e com 40°C'. *In: BBC News Brazil*. [S. l.], 17 maio 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-61487748>. Acesso em: 21 abr. 2022.

ALMEIDA, C. A. R.; LIMA, F. T. de A.; BORGES, M. M. Tectônicas Digitais: A (In)Tangibilidade no Processo de Projeto em Arquitetura. *Revista Design & Tecnologia*, v. 9, n. 18, p. 1-21, 2019.

ATTIA, S. *Regenerative and Positive Impact Architecture: Learning from Case Studies*. Alemanha: Springer, 28 de set. 2017.

BAPER, S. Y.; KHAYAT, M.; HASAN, L. Towards Regenerative Architecture: Material Effectiveness. *International Journal of Technology*, 2020.

BURRY J. BURRY, M. *The New Mathematics of Architecture*. London: ed. Thames e Hudson, 2010.

CARMO, P. M. *Superfícies Mínimas*. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA, 1987.

COLL, V.; HARRISON, M. Two Generalizations of a Property of the Catenary. *The American Mathematical Monthly*, [S. l.], v. 121, n. 2, p. 109-119, 5 fev. 2014. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/10.4169/amer.math.monthly.121.02.109?origin=JSTOR-pdf>. Acesso em: 21 abr. 2022.

DIAS, B. D. BEYOND SUSTAINABILITY: BIOPHILIC AND REGENERATIVE DESIGN IN ARCHITECTURE. *European Scientific Journal*, Portugal, p. 147-158, 13 mar. 2015.

- DRAGICEVIC, P. 1889 – Gaudí's Hanging Chain Models. *In: 1889 – Gaudí's Hanging Chain Models*. Dataphys. Disponível em: <http://dataphys.org/list/gaudi-hanging-chain-models/>. Acesso em: 23 abr. 2022.
- FILZ, G. H.; D'ANZA, G. Soft Spaces: Hybrid systems from structural membranes/cable-nets and conventional Building Technologies. **Proceedings of the TensiNet Symposium**, p. 378-389, 2019. Disponível em: https://acris.aalto.fi/ws/portalfiles/portal/37133295/Soft_Spaces.pdf. Acesso: mar. 2022.
- GONÇALVES, J. C.; DUARTE, D. H. S. 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, C. R. B. Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. **Design Studies**. v. 27, n. 3, p. 309-324, 2006.
- HUERTA, S. Structural Design in the Work of Gaudi. **Architectural Science Review**. Volume 49, n. 4, p. 324-339, 2006.
- HYPÉRIONS. Vicent Callebaut Architectures Paris, 2016. Disponível em: https://vincent.callebaut.org/object/160220_hyperions/hyperions/projects. Acesso em: 25 fev. 2022.
- KORB, J.; LINSÉNMAIR, K. E. The architecture of termite mounds: a result of a trade-off between thermoregulation and gas exchange?. **Behavioral Ecology**, v. 10, n. 3, p. 312-316, 1999. Disponível em: <https://academic.oup.com/beheco/article/10/3/312/201636>. Acesso em: mar. 2022.
- LIEW, K. M.; KITIPORNCHAI, S.; ZHANG, X. Z.; LIM, C. W. Analysis of the thermal stress behaviour of functionally graded hollow circular cylinders. **Elsevier**, v. 40, n. 1, p. 2355-2380, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020768303000611>. Acesso em: mar. 2022.
- LITTMAN, J. A. **Regenerative Architecture: A Pathway Beyond Sustainability**. Dissertação de Mestrado. University of Massachusetts – Amherst, 2009. 74 p. Disponível em: <http://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1389&context=theses>. Acesso em: mar. 2022.
- LONGO, L. F. **Como contraventar uma estrutura?**. Alto QI, 2022. Disponível em: <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/115001186613-Como-contraventar-uma-estrutura->. Acesso em: 18 abr. 2022.
- NARDIN, A. C. F. de; VAGHETTI, M. A. O.; ROMANO, F. V. Das partes para o todo: integrações para uma arquitetura e urbanismo vivos. **CADERNOS PROARQ**, v. 1, n. 36, p. 36 – 52, 2021. Disponível em: http://cadernos.proarq.fau.ufrj.br/public/docs/Proarq36_03_Das%20partes%20para%20o%20todo_Junho2021.pdf. Acesso em: fev. 2022.
- NIGUDKAR, S. 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.
- PEREZ-GARCIA, A.; GÓMEZ-MARTÍNEZ, F. Natural structures: strategies for geometric and morphological optimization. **Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009**, Valencia Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures 28 September – 2 October 2009, Universidad Politecnica de Valencia, Spain. Alberto DOMINGO and Carlos LAZARO (eds.)
- PIRES, J. de F.; SILVEIRA, C. E.; 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.
- POTTMANN, H. ASPERL, A. HOFER, M. KILIAN, A. **Architectural Geometry**. Exton, Pennsylvania: Bentley Institute Press, 1ª ed., 2007.
- REUTERS, N. C. Relatório climático da ONU deve emitir alertas severos sobre aquecimento global. *In: REUTERS, Nina Chestney. G1 Globo*. [S. l.], 5 ago. 2021. Disponível em:

Periódico Técnico e Científico
Cidades Verdes

ISSN eletrônico 2317-8604, volume 10, número 27, 2022

<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2021/08/05/relatorio-climatico-da-onu-deve-emitir-alertas-severos-sobre-aquecimento-global.ghtml>. Acesso em: 21 abr. 2022.

SILVA, Z. M. da C.; OLIVEIRA, A. M. da S.; GONZAGA, L. G. das M. A busca por princípios biomiméticos em cupins do cerrado para aplicação em edificações de baixo consumo energético. **Revista UNIABEU**, v. 12, n. 32, p. 126-142, 2019. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/322562111.pdf>. Acesso em: mar. 2022.

THIAGARAJAN, K. **The world's most polluted capital city**. BBC, 4 abr. 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/future/article/20220405-the-fungi-cleaning-new-delhis-air>. Acesso em: 18 abr. 2022.

WANG, L. **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/articles/urban-farming-utopia-in-india-produces-more-energy-than-it-uses/) Acesso em: 15 abril 2022.

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.