

Modelagem Paramétrica da Geometria Complexa de Estruturas Regenerativas na Arquitetura

Parametric Modeling of Complex Geometry of Regenerative Structures in Architecture

Janice de Freitas Pires

Universidade Federal de Pelotas, Brasil
janicefp@hotmai.com

Alice Theresinha Cybis Pereira

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil
acybis@gmail

Abstract

The regenerative architecture emerges with an approach beyond the sustainability of buildings, seeking to extend the relationship with the environment, in order to promote the regeneration of living systems, through a complete understanding of the place to design regenerative structures. In this work, with a didactic objective, a study is carried out on the principles of regenerative architecture and its association with recurrent complex geometries in nature, structuring parametric modeling processes of such geometries.

Keywords: Regenerative architecture; Complex geometry; Teaching architecture; Parametric modeling.

Introdução

Nas últimas cinco décadas, principalmente devido ao crescimento dos problemas ambientais que causam uma profunda preocupação em toda humanidade, o conceito de *sustentabilidade* tem sido amplamente incorporado na arquitetura. Gonçalves e Duarte (2006, p. 52) se referem a um período da história da arquitetura no qual a tecnologia de sistemas prediais foi impulsionada pela crença de que ofereceria meios para o controle total das condições ambientais de qualquer edifício, em detrimento ao uso da *arquitetura bioclimática*. A partir das preocupações com o consumo de energia, originadas na década de 1970, o tema da arquitetura sustentável evoluiu para outros aspectos do impacto ambiental da construção, como o gerado pelos processos de industrialização dos materiais e a busca por sistemas prediais mais eficientes.

Littman (2009), no entanto, aponta que sustentabilidade na arquitetura, como é entendida pela sociedade moderna hoje, é uma medida insuficiente para o projeto de arquitetura, atual e futura. O autor destaca que a entrada contínua de energia e recursos em uma estrutura para o funcionamento saudável e completo não é sustentável por qualquer meio e que o paradigma atual em arquitetura é a degeneração e o emprego de tecnologias obsoletas. Na concepção regenerativa, o único meio de um edifício ser "além de sustentável", ou seja, "regenerativo", é ter o potencial para a integração do mundo natural como um parceiro igual. O projetista deve assim conhecer o lugar em um nível íntimo e profundo com base nos padrões, forças e energias existentes, que desenvolvem um retrato único de tal local. Os dados tangíveis, revelados por sua dinâmica, são então usados como as informações generativas da arquitetura.

Em face da relevância e atualidade do tema, identifica-se a necessidade de tratar tais conceitos no contexto formativo da

arquitetura. Para tanto, uma das abordagens iniciais, segundo Bertol (2011), é o próprio conhecimento da geometria associada às estruturas da natureza, como resultado de um diagrama de forças que interagem em tal lugar (Thompson, 1917).

Este trabalho tem o objetivo de sistematizar o conhecimento associado à geometria das formas naturais e utilizar este conhecimento como uma ontologia de apoio para a modelagem paramétrica da geometria da arquitetura contemporânea direcionada a regeneração.

Princípios de Design Regenerativo

As seguintes ideias que serão expostas fazem parte dos estudos desenvolvidos em Littmann (2009), o qual buscou traçar alguns princípios para projetos de regeneração na arquitetura. Segundo o autor, compreender o funcionamento do meio natural é uma das premissas da arquitetura regenerativa. Neste contexto, a arquitetura regenerativa envolveria o mundo natural como meio gerador da arquitetura, empregando uma compreensão completa e abrangente dos sistemas naturais e de vida no projeto de uma estrutura.

A análise do local, segundo Littmann (2009), exerce um papel central no desenvolvimento de um projeto de concepção regenerativa. Para o autor isso ocorre em parte porque os tecidos são construídos em torno do fluxo de energia e tornam-se a expressão física ou forma de realização (personificação) desta energia. Neste processo, a natureza essencial do fluxo e a correspondente natureza do meio através do qual ele passa determinam a sua expressão na forma. A percepção de lugar como um conjunto de padrões e sistemas interdependentes é o primeiro passo que o projetista deve dar no processo de concepção regenerativa.

Como um dos princípios orientadores para a regeneração, o autor destaca a *integração dos sistemas inteiros de design*, que está amparada nos seguintes critérios: Todos os sistemas e entidades são contabilizados e incorporados no projeto geral do sistema; Todos os sistemas estão envolvidos em comunidades de relações de apoio mútuo; Cada uma das entidades do sistema deve desempenhar mais do que uma função ou satisfazer mais do que uma necessidade dentro do sistema (multiplicidade); cada necessidade dentro do sistema é recebida com mais de uma solução, não existindo uma única solução para o seu funcionamento (redundância). Por exemplo, a aquisição de energia utilizável por meio de mais de uma solução (energia solar, eólica ou biomassa) fortalece o sistema, em termos energéticos, pois permite solidificar a entrada de energia, tornando-o mais confiável, eficiente e benéfico.

Outro princípio apontado pelo autor é da *integração na paisagem*, em que se destacam as seguintes ideias: a análise do local, seus elementos e sistemas naturais são a base geradora do projeto; a habitação e integração paisagística criam uma nova unidade / entidade inteira; a construção da habitação é naturalmente artificial ou artificialmente natural, tendo-se, na arquitetura regenerativa, a necessidade de transpor-se a lacuna entre o artificial e o natural, fazendo-se uma síntese da relação entre os dois.

O princípio dos *limites inteligentes* estabelece que cada programa tenha um limite mínimo exigido, com uma máxima potencialmente infinita. O projeto reflete o equilíbrio do programa e cada material e espaço é potencialmente maximizado e integrado em todo o seu potencial de entrada líquida positiva no sistema. A noção de "Limites inteligentes" é crucial para o processo de design, pois garante que o equilíbrio possa ser cumprido dentro do sistema, sem limitar o potencial de regeneração dentro do sistema.

O princípio da *construção inteligente* refere-se à construção da arquitetura, bem como a construção de sistemas e o local; respeita a eficiência dos materiais, maximização de seu potencial e construtibilidade.

O princípio da *ecologia ousada* (*Bold Ecology*) refere-se à implementação e proliferação de sistemas ecológicos que executam múltiplas funções, são regenerativos e fornecem uma produção líquida positiva.

Na próxima seção serão discutidas algumas estruturas recorrentes na natureza que tem potencial para integrar estes princípios.

Estruturas naturais regenerativas

Bertol (2011) aponta que a natureza é uma tendência que leva a uma abordagem interdisciplinar em design. Para a autora, a beleza das formas encontradas na natureza é reforçada pela sua funcionalidade, pois além da inspiração estética, oferece estratégias de design e eficiência estrutural. "As ciências naturais têm um papel importante em ajudarnos a compreender a lógica do mundo natural e oferecem muitas lições para o desenho de formas artificiais" (Bertol, 2011, p. IV). A geometria assim possui uma estrita relação com a estrutura de tais formas, englobando uma

caracterização que pode ser aplicada para a maioria dos fenômenos e objetos do mundo real.

A definição de D'Arcy Thompson (1917) da forma como 'um diagrama de forças' é entendida em Bertol (2011, pág. IV) como "um ponto de partida para um discurso arquitetônico contemporâneo, em que a definição das formas no ambiente construído deva ser impulsionada por intuição estrutural em um diálogo entre geometria, estética e materiais".

A autora destaca que as formas e os padrões podem oferecer um meio potente para interpretar os fenômenos que ocorrem na natureza (desde a biologia, química, física, geometria, zoologia, biofísica e ciências dos materiais). Podem assim oferecer modelos conceituais para a concepção de formas artificiais.

Um importante conceito geométrico apontado por Bertol (2011) como recorrente na natureza são os *triângulos* e *hexágonos* como formas fundamentais para o equilíbrio. Em estática, o triângulo é a figura de base para alcançar o equilíbrio estrutural. Na arquitetura, as geodésicas propostas por Buckminster Fuller são um exemplo de aplicação desta abordagem. Segundo a autora, este princípio de equilíbrio pode ser alargado a processos biológicos, tais como a divisão celular e crescimento.

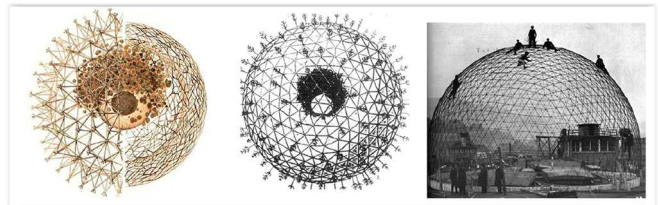


Figura 1: Radiolária desenhada por E. Hackel (1872) e forma geodésica do Planetário em Jena (C. Zeiss)

Fonte das imagens: (2009) Perez-Garcia e Gómez-Martínez

Bertol (2010) relata que Plateau ao fazer suas observações em bolhas de espuma de sabão identificou que estas no plano bidimensional se cruzam em três vértices de um ângulo que tende a ser de 120° e em três dimensões, via quatro vértices semelhantes aos ângulos de um tetraedro. Posteriormente aos experimentos de Plateau, D'Arcy Thompson (1917) reconheceu que os mesmos princípios geométricos se aplicam a células vivas, que seguem os princípios da tensão superficial com base na eficiência energética: Células *hexagonais* convergindo em agregados a cerca de ângulos 120° são uma característica muito comum de formas na natureza.

Os experimentos de Plateau com formas de bolhas de sabão e sua configuração evoluiu para o desenvolvimento de uma teoria de uma classe especial de superfícies recorrentes na natureza, denominadas de *superfícies mínimas*. Este teoria teve grande impulso a partir da metade do século XIX e principalmente no século XX, com a evolução da dinâmica de fluidos, na física, e sistemas complexos, na matemática (Bertol, 2011). Uma *superfície mínima* é a superfície que possui menor área para um dado contorno fixo (Osserman, 1986).

O hexágono tem a propriedade de minimizar áreas de superfícies, assim como ocorre com as superfícies mínimas descobertas por Plateau. O padrão hexagonal é descrito como ladrilho de área de superfície mínima: com este padrão, as abelhas minimizam a quantidade de cera necessária para a construção da colmeia (Bertol, 2011). A autora destaca que o favo de mel é um exemplo perfeito de uma forma gerada como resposta à eficiência estrutural e economia de material.

Outro exemplo apontado por Bertol de estrutura natural que integra os conceitos anteriormente citados é de uma radiolária (organismos unicelulares, caracterizados por um esqueleto mineral, que na maioria dos casos é feita de sílica - dióxido de silício). A *Callimetra Nassellaria*, desenhada por Haeckel (Figura 02), tem a forma de um tetraedro esférico, com as faces que se assemelham as superfícies experimentadas por Plateau para a definição das superfícies de área mínima.

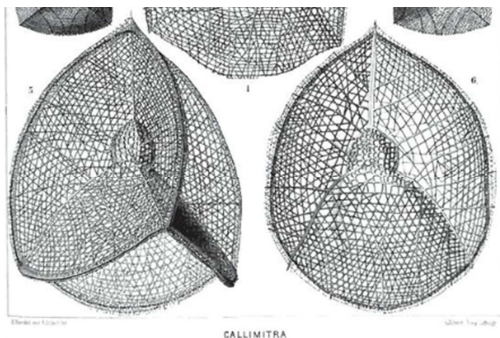


Figura 2: Radiolária *Callimetra* desenhada por E. Haeckel (1872) com a forma de um tetraedro esférico e superfície mínima.

Fonte: Bertol (2011)

A autora ainda cita outras ocorrências de padrões hexagonais que exercem princípios de equilíbrio e eficiência estrutural, tais como o das asas das libélulas e da lama rachada de formações geológicas.

Para Allgayer (2009) a questão fundamental em superfícies mínimas é o equilíbrio de tensões. Segundo o autor, as configurações que são assumidas decorrem da busca em anular as forças externas e internas que atuam sobre os limites físicos da matéria que constitui estas superfícies. Ao buscar o equilíbrio, a superfície de área mínima é configurada, como o objetivo de alcançar o melhor aproveitamento de sua tensão superficial. Desta maneira, estas superfícies caracterizam-se pela redução de material, pela otimização das tensões de trabalho e por atuarem no equilíbrio energético.

Perez-Garcia e Gómez-Martínez (2009) identificaram que os arranjos mais usuais na natureza são controlados por quatro fatores principais: a natureza das forças, a forma global, o design local e a qualidade do material. Segundo os autores, estes fatores determinam a geometria. No entanto, parâmetros adicionais, tais como padrão ou iluminação do material, irão influenciar outras características gerais como a

flexibilidade, a integração, a continuidade ou a autotensão, envolvidos em alguns exemplos. Estes se configuram geralmente nas estruturas de pneus, conchas, árvores, teias e esqueletos.

Os autores esclarecem que as estruturas pneumáticas são as mais eficientes em termos de espaço / peso, sendo estabilizadas por si mesmas por terem um envelope dúctil tensionado, internamente pressurizado por um fluido e rodeado por um meio. Dessa maneira, se caracterizam como uma estrutura muito adaptável, que pode facilmente mudar a sua forma para acomodar a geometria circundante (Perez-Garcia e Gómez-Martínez, 2009). Para os autores, na maioria dos casos, as estruturas finais da natureza, tais como ovos, ossos, esqueletos, conchas e teias, é apenas a solidificação de pneus.

Outra qualidade das estruturas pneumáticas, destacada por Perez-Garcia e Gómez-Martínez (2009), é a maneira como elas se combinam para produzir grades ideais com comportamento de menos energia, sendo estruturalmente e energeticamente eficientes. Segundo Bertol (2009) pode-se identificar a ocorrência de partições uniformes do espaço também associadas a alguns tipos de superfícies mínimas (Bertol, 2011), tal como a superfície de Schwarz, que é triplamente periódica. Ela se configura por translação de um elemento básico segundo uma grade regular (figura 03). Osserman (1986) destaca que esta é a única superfície mínima obtida por translação.

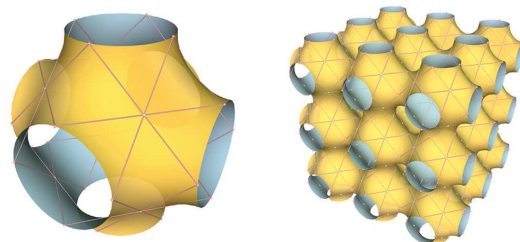


Figura 3: Superfície mínima triplamente periódica.

Fonte:

<http://www.indiana.edu/~minimal/archive/Triply/genus3/PLines/web/index.html>

Superfícies mínimas na Arquitetura

Gaudi e Frei Otto utilizaram largamente o princípio anteriormente descrito ao propor suas estruturas para arquitetura. Para Frei Otto, sendo o pneu o sistema responsável do crescimento, a forma definitiva é recorrente de um arranjo chamado de *funicular*, o qual é produzido pelas cargas no pneu flexível. Segundo Perez-Garcia e Gómez-Martínez (2009), este é um *processo tecnológico muito elevado de encontrar a forma ótima*. Tendo a propriedade de superfícies mínimas, as tensões superficiais são semelhantes em todas as direções, como foi experimentado nas tendas de tração de Frei Otto no século XX. Meio século antes de Otto, no final do século XIX, Gaudi, influenciado por tais ideias, trabalhou com modelos físicos para encontrar a forma ótima em arranjos *funiculares*, com o objetivo de conceber projetos de estruturas geométricas complexas e ao mesmo tempo de

alto desempenho estrutural (Figura 04), como na Colônia Güell e na Sagrada Família.



Figura 4: Modelo funicular utilizado por Gaudí.

Fonte: <https://www.quora.com/What-is-Funicular-geometry-What-is-its-significance-in-Structures-in-Architecture>

Na arquitetura contemporânea notadamente dos últimos 20 anos, modelos funiculares de superfícies mínimas têm sido empregados como princípio de encontrar a forma ótima, para critérios estruturais e de equilíbrio, além de economia de material. Exemplos são o Main Station Stuttgart, na Alemanha, e o Australian Wildlife Health Centre na Austrália (Figuras 05 e 06).

O Main Station de Ingenhoven architects é uma estação de passagem que conecta várias ferrovias no centro da cidade de Stuttgart, Alemanha. Segundo Burry & Burry (2010), a superfície da estação segue o uso de superfícies que são encontradas fisicamente pela suspensão de uma rede de corrente que irá conformar, após ser submetida à deformação pela gravidade, uma superfície mínima. A superfície mínima encontrada para o projeto da estação foi posteriormente refinada por métodos de cálculo complexo utilizando um software de elementos finitos (FEM). O objetivo foi resolver duas questões principais (Burry & Burry, 2010): O primeiro é a questão da economia estrutural e material, e o segundo é a provisão de luz e ar para o vasto espaço subterrâneo, sem criar consumo de energia significativo ou poluição de carbono. O autor ainda destaca que tais superfícies podem ser formadas em torno de um orifício, chamado "olho", no qual um funil como cálice é formado como uma unidade modular protótipo. Isto permitiu combinar telhado, suporte vertical e abertura para o céu em uma única superfície mínima (Figura 05). Um telhado de casca contínua cobriria todo o espaço subterrâneo, admitindo luz natural e ventilação em todos os lugares através dos olhos cálice. Burry & Burry (2010) descrevem que, para descobrir como múltiplos suportes de cálice e paredes de calha interagiriam juntos em uma estrutura contínua de telhado, foi construído um modelo de corrente física suspensa em forma de malha quadrilateral. Esta foi ancorada nos pontos alto e baixo e permitiu deformar sob seu peso próprio para dar uma forma em pura tensão. Quando invertida e feita rígida, esta mesma forma de superfície distribui forças na compressão pura, minimizando a profundidade e a necessidade de reforço de aço na casca. A proposta em formato de "olho" e "cálice" se baseou em

modelos desenvolvidos por Otto, sendo este arquiteto o consultor técnico para a definição da superfície da estação.



Figura 5: Na parte superior, o interior do Main Station Stuttgart e uma seção da estrutura de superfície mínima; Na parte inferior, modelo funicular da superfície mínima da estação.

Fonte: <http://www.ingenhovenarchitects.com/projects/more-projects/main-station-stuttgart/?img=1>

O Australian Wildlife Health Centre (Figura 06) é um ambulatório para o tratamento dos animais nativos na Austrália, em que foi empregada a superfície mínima descoberta pelo matemático brasileiro Celso Costa, em 1982. De acordo com Burry e Burry (2010), esta superfície mínima é do gênero 3, o que significa que possui três furos, com três oculi (aberturas redondas) que trazem a luz natural no pátio e que atuam como chaminés solares. Estas aberturas criam três clarabóias que são distribuídas uniformemente ao redor do principal espaço de visão do ambulatório. Topologicamente a superfície de Costa é derivada de um toro circular (um pneu), em uma transformação em que três pontos do toro são lançados ao infinito (Carmo, 1987) conforme as imagens da Figura 06.



Figura 06: Na parte superior, Australian Wildlife Health Centre, do arquiteto Paul Minifie, Austrália; Na parte inferior: A topologia da superfície de Costa.

Fonte: <http://www.behmerwright.com.au/projects/australian-wildlife-centre-healesville/>; <http://www.archello.com/en/project/australian-wildlife-health-centre/image-2>; <https://victorcdt.wordpress.com/2013/09/08/12/>

A teoria das superfícies mínimas evolui desde os primeiros estudos de Lagrange e os experimentos de Plateau com bolhas de sabão em 1850 para modelos mais complexos, encontrados principalmente nos séculos XIX e XX. A palavra mínima, segundo Carmo (1987), está relacionada com o seguinte problema proposto por Lagrange em 1760: Dada

uma curva fechada C (sem auto-interseções), achar a *superfície de área mínima que tem esta curva como fronteira*.

A primeira superfície mínima, o plano, foi definida matematicamente por Lagrange. No entanto, a fórmula de Lagrange que permitiu esta definição não pode ser aplicada para encontrar a área mínima superficial para qualquer tipo de curva fechada, em uma generalização.

Em 1764, Euler descobriu uma superfície que apresentava para um dado volume a menor área de superfície possível – o *catenoide*. Esta superfície é obtida pela revolução de uma curva *catenária* em torno de um eixo ortogonal ao eixo de simetria da curva (da esquerda para a direita, primeira imagem da Figura 07 na parte superior).

Em 1776, Jean Baptiste Meusnier descobriu o *Helicoide* e provou que era também uma superfície mínima. O nome é derivado da curva hélice; Para cada ponto no helicoide, existe uma hélice que passa através desse ponto. O *Helicoide* compartilha algumas propriedades interessantes com o *Catenoide*, tais como a habilidade de dobrar um no outro sem rasgar a superfície (da esquerda para a direita, segunda imagem da Figura 07 na parte superior).

Em 1834, Heinrich Ferdinand Scherk descobriu duas outras superfícies mínimas, que foram chamadas de *Scherk's First Surface* e *Scherk's Second Surface*. A primeira superfície é duplamente periódica, enquanto a segunda é apenas individualmente periódica. As superfícies são conjugadas entre si (da esquerda para a direita, terceira e quarta imagem da Figura 07 na parte superior).

Em 1855, como parte de seu trabalho sobre superfícies regulares mínimas, o matemático belga Eugene Charles Catalan criou uma superfície mínima contendo toda uma família de parábolas, agora chamada de *superfície mínima catalã* (da esquerda para a direita, primeira imagem da Figura 07 na parte inferior).

Em 1864, Alfred Enneper descobriu uma superfície mínima conjugada a si própria, agora chamada *Superfície Enneper* (Verzea, 2012). Ela é uma superfície mínima completa com duas linhas retas em sua estrutura, sendo que esta superfície não é incorporada, ou seja, ela possui autointerseção (da esquerda para a direita, segunda imagem da Figura 07 na parte inferior).

Até 1982, as únicas superfícies mínimas incorporadas e de curvatura total finita eram o plano, o catenoide e o helicoide.

Em 1982, Costa encontrou outra superfície com estas propriedades, a qual esta ilustrada na Figura 07, da esquerda para a direita, a terceira imagem na parte inferior. Ele desenvolveu um estudo que permitiu definir sua superfície como a primeira de genus 3, que corresponde a três punções sobre a superfície, com curvatura total finita e incorporada, ou seja, sem autointerseção (Carmo, 1987).

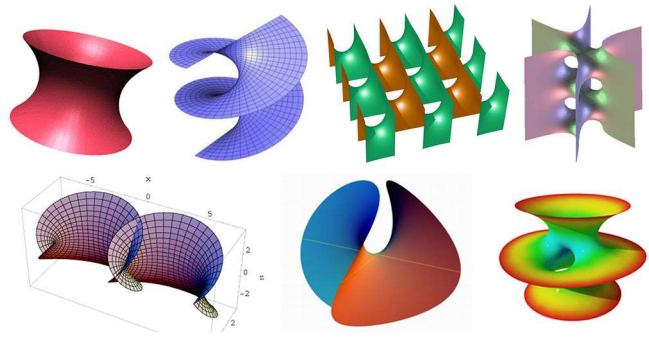


Figura 07: Catenoide, Helicoide, Primeira e Segunda superfícies de Scherk, Superfície de Catalã, Enneper e Superfície de Costa.

Fonte: <https://www2.le.ac.uk/departments/mathematics/extranet/staff-material/staff-profiles/kl96/stuff/lopez-ros-deformation-of-the-catenoid/view>;
<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/helicoid.html>
<http://numod.ins.uni-bonn.de/grape/EXAMPLES/AMANDUS/GIF/towersym.gif>;
https://www.math.hmc.edu/~gu/curves_and_surfaces/surfaces/catala.html;
<http://www.indiana.edu/~minimal/maze/enneper.html>;
<http://www.eg-models.de/models/>

Estas e mais outras superfícies mínimas foram descritas entre os séculos XIX e XX, utilizando-se da geometria diferencial e do cálculo por variáveis complexas, além da descrição paramétrica de superfícies. No entanto, segundo Carmo (1987), estes desenvolvimentos matemáticos não permitiram encontrar uma solução global para o problema de Lagrange. Estes primeiros exemplos, exceto a de Costa, segundo Verzea (2012), integram superfícies mínimas cujas parametrizações são simples. O autor destaca que a superfície mínima descoberta por Celso Costa em 1982 possui uma parametrização bem mais complexa, mesmo pertencendo em álgebra ao mesmo grupo diédrico de simetrias. Enquanto Costa foi o primeiro a ter imaginado a superfície e tê-la descrito por meio de funções elípticas (Carmo, 1987), parametrizá-la seria muito difícil e a primeira parametrização teve que esperar até 1986 (Verzea, 2012). Outra questão a destacar é que esta superfície só pode ser visualizada em 1986 quando David A. Hoffman e William H. Meeks inseriram sua descrição paramétrica em um programa gráfico computacional (Carmo, 1987). Em tal momento foi possível identificar a beleza da superfície e suas simetrias rotacionais e de reflexão (Figura 10).

Na sequência, serão desenvolvidos processos de modelagem paramétrica destas superfícies com um enfoque didático para aplicação na arquitetura.

A modelagem paramétrica de superfícies mínimas

Compreender a geometria complexa que conformam algumas superfícies presentes na natureza, tal como as de superfícies mínimas, é o primeiro passo para representar parametricamente estruturas naturais com potencial regenerativo para arquitetura.

Tais modelos paramétricos de estruturas geométricas regenerativas podem ser usados para suportar: a atividade de análise de padrões que moldam as formas do local, no sentido

de compreender como estes padrões influenciam nos processos de regeneração; a avaliação de desempenho das estruturas quanto ao condicionamento térmico do edifício projetado; a proposição formal de estruturas em um processo generativo, alcançado por meio de técnicas paramétricas de representação digital (Pires et al, 2016).

Para Bertol (2011), a criação de modelos digitais é a etapa inicial deste processo. Para a autora, por meio dos modelos digitais se podem gerar vários níveis de complexidade em diferentes escalas do mesmo modelo. Os modelos digitais incorporam propriedades e atributos que podem definir uma forma não apenas em seus aspectos geométricos, mas também como uma configuração dinâmica que muda com o tempo, definindo-os quase como um organismo vivo. A autora entende que as representações computacionais contemporâneas trazem ideias para a interpretação das formas naturais. Nesse contexto, a exploração de uma forma orgânica deve ir além do seu valor representacional, integrando o seu modelo computacional em vários aspectos, o que exige um conhecimento aprofundado de modelos (por exemplo, para simulações de aspectos físicos em interação com geometria e materiais).

No presente trabalho, o estudo será focado na representação da geometria em seus aspectos conceituais. Para tanto, foram desenvolvidos processos de modelagem paramétrica da geometria de algumas das superfícies mínimas descritas na seção anterior: o *catenoide*, o *helicóide* e a superfície mínima descoberta por *Costa*. Desde que estas superfícies possuem propriedades interessantes do ponto de vista arquitetônico, considera-se que a representação paramétrica destas superfícies fornece uma estrutura de saber que auxilia a compreender a geometria complexa de estruturas regenerativas para arquitetura.

A modelagem paramétrica pode ser desenvolvida com base em vários tipos de representação, tais como: pelos elementos principais da superfície (geratrizes e diretrizes) e os processos de geração; por descrição paramétrica; e por simulação das condições físicas que as conformam (expansão e relaxamento de superfícies topologicamente equivalentes). Neste trabalho será apresentado o primeiro tipo de representação, aquele em que as superfícies serão conformadas por meio da modelagem de seus elementos principais e os seus processos de geração.

Modelagem paramétrica do *catenoide*

Considerando-se o *catenoide* como a superfície gerada pela revolução de uma curva *catenária* em torno de um eixo ortogonal ao seu eixo de simetria, representou-se inicialmente a curva *catenária* geratriz da superfície. Os parâmetros de representação da curva catenária são: os pontos inicial e final da curva (A) e (B); o comprimento da curva (L) e a direção da gravidade (G), que neste caso encontra-se no eixo y, já que a curva foi orientada lateralmente para a revolução em torno de um eixo vertical.

A figura 08 ilustra o processo de representação do catenoide e a correspondente representação paramétrica

por programação visual, desenvolvida no plug-in *Grasshopper* junto ao software *Rhinocerus*. Nesta figura, foram destacados com retângulos na cor verde cada um dos componentes principais que integram a estrutura geométrica da superfície: a geratriz catenária, o eixo de revolução e o tipo de processo de geração, por superfície de revolução. O eixo de revolução foi definido por uma curva orientada (SDL) no eixo z (uma reta vertical) e a revolução (RevSrf) exigiu informar os parâmetros: perfil para a revolução (P), neste caso a curva catenária, o eixo de revolução (A) e um domínio (D), que é dado pelo ângulo de revolução, neste caso, 360° .

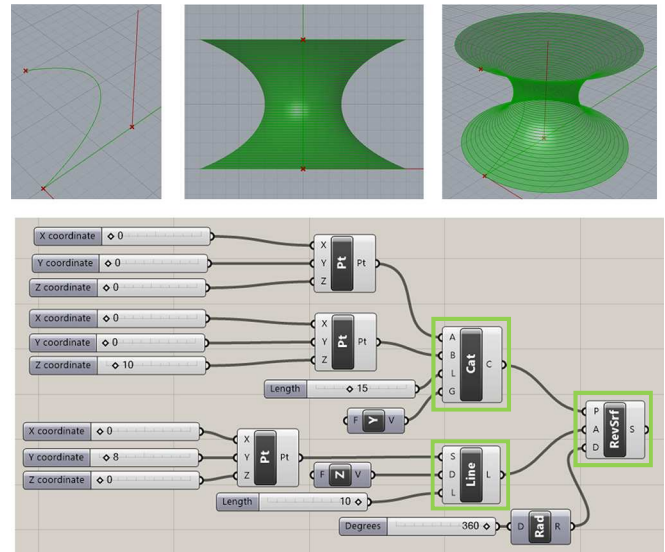


Figura 08: Representação paramétrica de um *catenoide*.

Fonte: Elaboração própria.

Modelagem paramétrica do *helicóide*

O *Helicoide* é uma superfície gerada por uma *reta* que se apoia em diretrizes *hélices*, sendo da classe de superfícies *regradas* (Pottmann et al, 2007) ou denominada de *retilíneas* de acordo com a classificação de Gaspar Monge adotada em Rodrigues (1960). Nesta classe, se tem os *helicoides desenvolvíveis* e *não desenvolvíveis*, sendo estes últimos denominados de *helicoides de plano diretor*, devido ao fato da geratriz *reta* se manter, durante o movimento de geração, paralela a um plano diretor (Rodrigues, 1960). Este é o *helicoides de superfície mínima*.

Segundo Pottmann et al (2007), a *hélice* é uma curva descrita simultaneamente por movimentos de *translação* e *rotação*: os pontos que conformam a curva têm uma translação ao longo de um eixo z e uma rotação ao redor do mesmo eixo. Estas hélices se encontram configuradas sobre as superfícies de cilindros, cones ou esferas e, dentre estas, a hélice cilíndrica é definida como uma curva *geodésica*. Tal curva é o caminho mais curto entre dois pontos de uma superfície (Pottmann et al, 2007). No caso do cilindro, ao ser planificado, a hélice se corresponde a imagem de uma linha reta, que é o caminho mais curto entre dois pontos de um plano. Na figura 09 se tem a representação do helicóide não desenvolvível, que é gerado por uma reta apoiada em duas hélices cilíndricas, ou em uma hélice cilíndrica e um eixo, mantendo-se paralela a um plano

diretor horizontal. Para representar as *hélices cilíndricas*, inicialmente foi gerada a superfície de um cilindro, a partir de dois arcos deslocados um em relação ao outro no eixo vertical e a geração da superfície entre os arcos por superfície regradada (ruled surfaces). Sobre esta porção de superfície cilíndrica foi extraída a curva geodésica entre dois pontos da superfície. A seguir foi feita uma cópia desta geodésica por equidistância (*of set*), para representar a segunda geodésica (hélice cilíndrica) que irá conformar a superfície do helicóide. Finalmente o helicóide foi gerado por superfície regradada (ruled surface) em que as curvas de base são as duas hélices cilíndricas obtidas como geodésicas de uma porção de um cilindro. Na mesma figura 09, na parte inferior, está ilustrada a programação de todo o processo de geração.

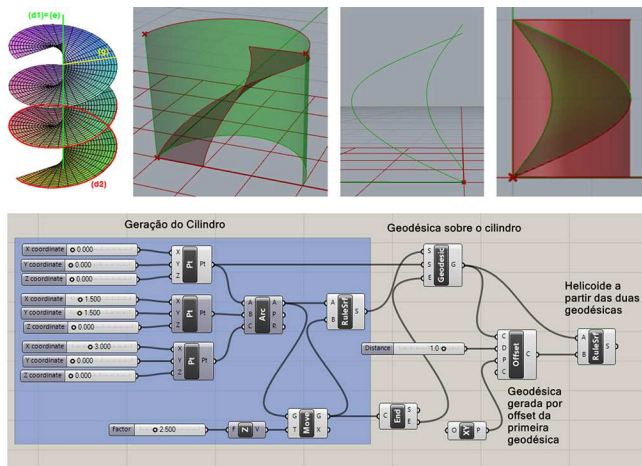


Figura 09: Representação paramétrica de um *helicóide*.

Fonte: Elaboração própria.

Modelagem paramétrica da *superfície de Costa*

A superfície de Costa é uma superfície dita com três fins: dois deles são em *catenoide* e um deles é *planar*, o que indica a presença de linhas retas nesta superfície (Carmo, 1987). Além disso, conforme já mencionado, ela possui simetrias de rotação e translação, resultando na possibilidade de otimização da modelagem. Para desenvolver o processo de modelagem, foi feita inicialmente uma análise da geometria desta superfície, por meio das seguintes atividades: análises das simetrias e das curvas geratrizes e diretrizes a partir de imagens disponibilizadas na web e diretamente sobre o modelo digital desenvolvido por David A. Hoffman e William H. Meeks, disponível em <http://www.eg-models.de/models/>.

A partir desta análise identificou-se a presença de dois arcos circulares, uma curva catenária inclinada 13 graus em relação ao eixo z e uma curva que se encontra unida a uma reta. Estas curvas foram representadas com os componentes: arco (Arc); catenária (Cat); curvas NURBS (Nurbs); e reta (Line). Com estas linhas representadas, gerou-se a superfície por varredura, com o componente *Net surface*. A esta porção de superfície foram aplicadas três transformações de espelhamento (Mirror): a primeira no plano yz; a segunda, no plano xz; e a terceira no plano xy. Por fim, foi feita uma rotação (Rotate) de 90 graus de uma das composições obtidas para completar a totalidade da superfície.

A Figura 10 apresenta: na primeira linha, as imagens utilizadas para o desenvolvimento da análise da superfície; na segunda linha, o modelo de Hoffmann e Meeks seccionado para obter as curvas geratrizes da superfície; na terceira linha, as curvas e uma porção da superfície, modeladas parametricamente, a qual se repete em simetrias para formar a sua totalidade; na quarta linha, a programação para gerar a curva catenária que conforma a superfície; e na quinta linha, a programação inteira, com as curvas geratrizes, a geração das porções de superfície, as três transformações de reflexão, uma de translação e uma de rotação.

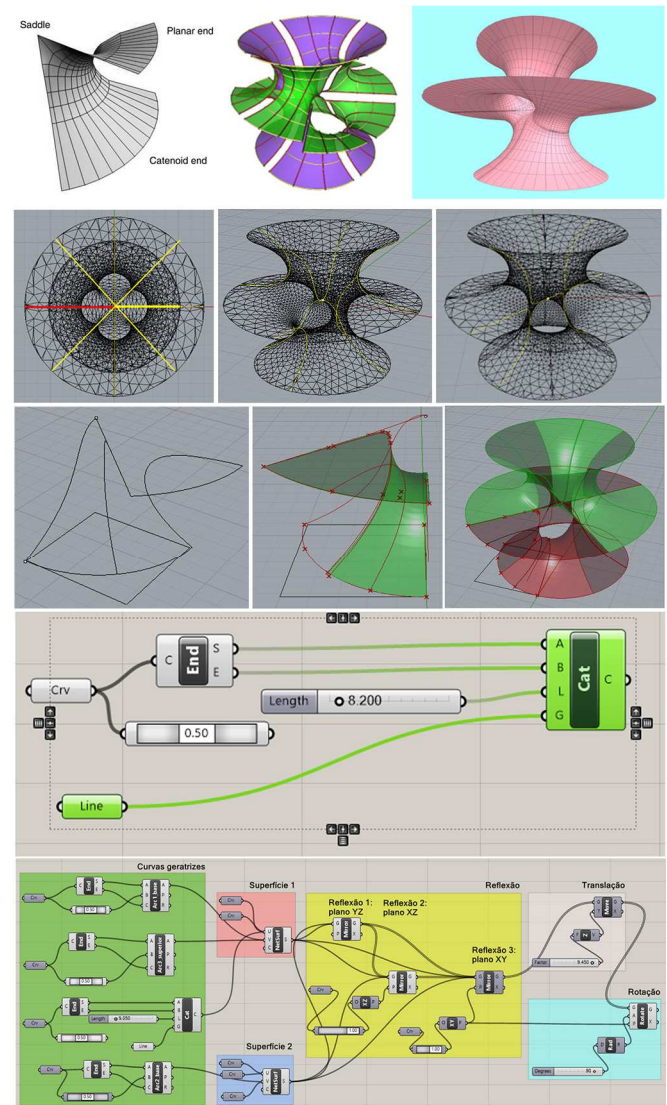


Figura 10: Representação paramétrica da *superfície de Costa*.

Fonte: <http://www.indiana.edu/~minimal/essays/costa/index.html>;
<http://www.indiana.edu/~minimal/archive/Tori/Tori/Costa/web/index.html>;
<http://profs.sci.univr.it/~baldo/tjs/costa.html>; Elaboração própria.

Resultados

Os resultados ainda são parciais, mas indicaram que a sistematização de processos de modelagem paramétrica das geometrias associadas às estruturas naturais exigiu detalhar

em um nível mais profunda as caracterizações apresentadas pelos autores de referência. O processo de revisão deste conhecimento envolveu principalmente a área da matemática, e seus resultados mais significativos foram tornar possível sistematizar novas estruturas de saber de geometria e modelagem paramétrica para inserção no ensino de arquitetura.

O desenvolvimento dos processos de modelagem paramétrica apresentados neste trabalho exigiu compreender os tipos de curvas envolvidas nas estruturas geométricas de superfícies complexas que possuem potencial de regeneração na arquitetura. Mesmo que as representações apresentadas caracterizem-se por ser de base conceitual, não abordando saberes mais específicos de cálculo matemático que envolveria álgebra, funções ou descrição paramétrica de curvas, e a lógica de programação, considera-se serem importantes para didaticamente explicitar estas geometrias.

Também é importante destacar as estruturas de saber apresentadas em Littmann (2009) e Bertol (2010), as quais podem ser amplamente associadas aos conceitos geométricos que envolvem as superfícies representadas.

Para cada uma das abordagens estudadas, estão sendo estruturadas taxonomias específicas e também aquelas relativas aos conceitos matemáticos e as técnicas e tecnologias de modelagem paramétrica de definição da geometria abordada. A estruturação de taxonomias da geometria complexa recorrente na arquitetura contemporânea faz parte de uma pesquisa de doutoramento e tem objetivos didáticos para o ensino de arquitetura.

Considerações Finais

Segundo Perez-Garcia e Gómez-Martínez (2009), a natureza desenvolve as suas estruturas a fim de alcançar sempre soluções energéticas ideais em longo prazo. O conhecimento sobre estruturas da natureza permite assim aprender sobre a morfologia ótima, integração funcional e eficiência, atributos relacionados com a sua geometria.

A explicitação dos aspectos teóricos e das técnicas de modelagem paramétrica de tais geometrias constituirá uma estrutura de conhecimento explícita e sua associação com aspectos regenerativos da arquitetura contemporânea, permitindo seu uso didático em contextos de formação em arquitetura.

Agradecimentos

Agradecemos a Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa em nível de doutoramento.

Referências

- Allgayer, R. (2009). Formas naturais e estruturação de superfícies mínimas em arquitetura. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 157 p. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/24723?show=full> Acesso: maio 2017.
- Bertol, D. (2011) Form Geometry Structure: from nature to design. Exton, Pennsylvania: Bentley Institute Press.
- Burry.J. Burry, M. (2010). The New Mathematics of Architecture. London: ed. Thames e Hudson.
- Carmo, M. P. (1987). Superfícies Mínimas. Rio de Janeiro: Instituto de matemática pura e aplicada
- Gonçalves, J. C. S.; Duarte, D. H. S. (2006) Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. Sustainable architecture: integration among environment, design and technology in research, design practice and education. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 51-81 out./dez. 2006. ISSN 1415-8876, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/issue/view/289> Acesso em: maio 2015.
- Littman, J. A. (2009) Regenerative Architecture: A Pathway Beyond Sustainability. *Dissertação de Mestrado*. University of Massachusetts – Amherst. 68 p. Disponível em: <http://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1389&context=theses> Acesso em: abril 2015
- Osserman, R. (1986) A Survey of Minimal Surfaces. 2. New York: Dover Publications, Inc.
- Perez-Garcia, A.; Gómez-Martínez, F. (2009) 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 Politécnica de Valencia, Spain. Alberto DOMINGO and Carlos LAZARO (eds.)
- Pires, J. F. Silveira, C. E. Fialho, F. A. P. (2016). ARQUITETURA REGENERATIVA: O Ensino e Aprendizagem para uma Nova Concepção em Arquitetura. *Travessias*, 10(2), 14-34.
- Pottmann, H. Asperl, A. Hofer, M. Kilian, A. (2007). Architectural Geometry. Exton, Penssylvania: Bentley Institute Press, 1ª ed.
- Rodrigues, A. (1960) Geometria Descritiva: Projetividades, Curvas e Superfícies. 1a ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico Ltda.
- Thompson, D. A. (1971). On Growth and Form. Cambridge: Cambridge University Press. 345 p.
- Verzea, A. (2012). Superfícies Mínimas. Disponível em: http://www.math.mcgill.ca/gantumur/math580f12/minimal_surfaces.pdf