

Recife 4 a 6 de Novembro 2015

VII Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção

Edificações, Infra-estrutura e Cidade: Do BIM ao CIM

ufpe.br/tic2015



CRIAÇÃO DE ALGORITMOS GERATIVOS DE ESTRUTURAS ARQUITETÔNICAS: PARAMETRIZAÇÃO DE ABÓBADAS MODULADAS EM CONCRETO ARMADO¹

PARAMETRIC-GENERATIVE ALGORITHM OF A MODULAR REINFORCED CONCRETE SHELL VAULT STRUCTURE

Rodrigo Caribé Miranda
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
rcmarq@live.com

Felipe Tavares da Silva
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
felipe.tavares@ufba.br

Resumo

Atualmente vem crescendo o interesse pela parametrização e pelos algoritmos gerativos de estruturas arquitetônicas, onde se busca a solução ótima para cada necessidade do programa, seja de consumo de material ou adequação geométrica da forma ao uso. Neste artigo, propõe-se um algoritmo gerativo de estruturas de abóbadas de arco parabólico em casca maciça de concreto armado. Para isto, foi considerada a geometria de um arco em forma de parábola quadrática e de formulações da Mecânica das Estruturas e da Resistência dos Materiais, relacionando a espessura da casca, resistência do concreto (fck), vão horizontal do arco e a relação entre flecha e vão do arco. A partir desta abóbada parametrizada pode-se obter o quantitativo do volume de concreto necessário e a taxa de consumo de concreto por área de planta coberta. Este modelo tridimensional parametrizado de abóbada pode ser muito útil durante o processo de concepção estrutural-arquitetônica deste sistema a fim de avaliar o desempenho estrutural, econômico e ambiental com base na taxa de consumo de concreto por metro quadrado.

Palavras-chave: Algoritmo Gerativo. Grasshopper. Estruturas. Casca. Concreto armado

Abstract

Currently there is growing interest in the generative algorithms and in the parametric architectural structures, where one seeks the optimal solution for every need of the program design, either consumable or geometric adaptation of the form to use. In this article, we propose a generative algorithm for reinforced concrete massive shell vault structures. For this, the geometry of an arc-shaped from a quadratic parabola and formulations of Structural Mechanics and Strength of Materials was considered, relating the shell thickness, concrete strength (fck), horizontal arc span and the relationship between sag and span of the arch. From this parametric vault, it can be obtained the amount of concrete required volume consumption rate in relation of a covered plan area. This three-dimensional parametric vault model can be very useful during the preliminary design process of these architectural structural system to assess the structural performance, economic or environmental, based on the rate of consumption of concrete per square meter.

Keywords: Generative algorithm. Grasshopper. Vault. Structures. Reinforced concrete

¹ MIRANDA, N.1; SILVA, N.2. Criação de algoritmos gerativos de estruturas arquitetônicas: parametrização de abóbadas moduladas em concreto armado. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 7., 2015, Recife. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2015.



1 INTRODUÇÃO

Os algoritmos consistem em uma sequência finita de instruções com objetivo de realizar alguma tarefa. Este conceito está inserido no cotidiano das pessoas, na programação computacional, como também em processos de projeto de edificações arquitetônicas.

Frequentemente se observa algoritmos utilizados no processo de projeto associados à parametrização, sendo esta um conjunto de regras que relacionam parâmetros definidores do sistema. Assim, em um projeto de uma edificação, é possível utilizar um algoritmo gerativo paramétrico para gerar um determinado sistema predial, podendo ser a estrutura, a forma externa, a forma da planta, sistema hidráulico, dentre muitos outros.

O uso de algoritmos gerativos paramétricos auxilia o projetista a encontrar a melhor conjuntura de parâmetros de modo a obter o resultado que melhor atenda aos requisitos de projeto. Estes requisitos geralmente são aspectos econômicos, de impacto ambiental, estéticos, funcionais, construtivos, dentre muitos outros.

Khabazi (2012) diz que o uso de algoritmo gerativo no processo de projeto de edificações capta vários tipos de informações como parâmetros de entrada e produz Geometrias como dado de saída. Esta tarefa só é prática se for realizada em ambiente computacional.

Kolarevic (2003) advoga que os processos de geração digital da forma do objeto arquitetônico estão abrindo novos espaços na investigação sobre a forma, saindo de uma conceituação de produção arbitrária da forma para uma conceituação de pesquisa e obtenção da forma, geralmente a partir de índices de desempenho.

Celani (2015), em seu artigo propõe uma abordagem parecida, ressaltando as diversas áreas em que esse conceito é aplicado, como ciência da computação, biologia e inteligência artificial.

Celani (2014), enfatiza que a parametrização e prototipagem rápida estão cada vez mais imersas no ambiente da produção arquitetônica, mudando drasticamente a forma de concepção. Tais ferramentas projetuais estimulam cada vez mais o uso de superfícies curvas e complexas em grandes empreendimentos, a análise de seu desempenho térmico para dimensionamento do condicionamento adequado do ar, conforto ambiental do usuário e economia energética, buscando sustentabilidade por um estudo sobre a aplicação de métodos generativos paramétricos para otimizar a proteção solar de superfícies complexas.

Mitchell (1970), fala sobre uso e conceitos a respeito dos algoritmos generativos, afirmando também que não é algo novo, o uso dessa metodologia remete a antigas épocas como a de Aristóteles que sua aplicação não necessariamente só poderia ser feita através do uso de computadores.

Especificamente em relação ao sistema estrutural há duas demandas urgentes nas primeiras fases de projeto: o pré-dimensionamento e o impacto econômico e ambiental da escolha do sistema. Utilizando formulações matemáticas que relacionem a espessura estrutural e o vão do sistema, pode-se conceber um algoritmo gerativo de estruturas, pré-dimensionando automaticamente estruturas com geometrias regulares e moduladas. O uso deste algoritmo, desmistifica o pré-dimensionamento estrutural como também fornece ao projetista informações sobre o impacto econômico-ambiental do contexto, como também oferece em tempo real a visualização da relação geométrica virtual tridimensional entre a espessura e os vãos.

Propõe-se neste artigo uma formulação analítica simplificada de pré-dimensionamento paramétrico de uma abóbada de arco parabólico de casca de concreto. Esta formulação foi utilizada em um algoritmo gerativo, implementada no ambiente do Rhinoceros/Grasshopper. Este algoritmo gerativo tem por objetivo tanto auxiliar a concepção deste sistema como também pode servir de instrumento didático em processos de aprendizagem de projeto tanto



de estruturas quanto de arquitetura.

2 METODOLOGIA

O processo de obtenção da geometria da abóbada no ambiente do Rhinoceros/Grasshopper foi dado pela utilização de uma função matemática que relaciona o vão e a flecha do arco parabólico (Equação [1]). A partir desta função da geometria do arco pode ser obtido comprimento do arco (Equação [2]).

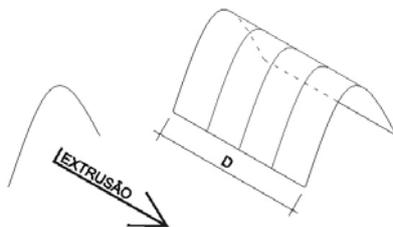
$$G(x) = \left(\frac{-4 \cdot f}{L^2} \right) \cdot x^2 + \left(\frac{4 \cdot f}{L} \right) \cdot x \quad [1]$$

$$C_{arco} = \frac{L^2}{16 \cdot f} \cdot \left\{ \frac{8 \cdot f}{L} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot f}{L} \right)^2} + \ln \left[\frac{4 \cdot f}{L} + \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot f}{L} \right)^2} \right] - \ln \left[\frac{-4 \cdot f}{L} + \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot f}{L} \right)^2} \right] \right\} \quad [2]$$

Nas expressões [1] e [2] f é a flecha do arco parabólico, L o vão do arco, $G(x)$ a função que define a geometria do arco e C_{arco} o comprimento curvo do arco.

A geração da superfície da abóbada é feita a partir da extrusão do arco parabólico definido pela equação [1], como ilustra a figura 1. Convencionou-se de que a dimensão da extrusão é duas vezes o comprimento do vão horizontal do arco.

Figura 1 – Extrusão da parábola para obtenção da superfície da abóbada.



Fonte: produzido pelos autores.

Além da forma geométrica da superfície da abóbada, foi também parametrizada a relação entre a espessura da casca, as dimensões da flecha e do vão e a resistência do concreto. Para isto, foram determinados o esforço normal e o momento fletor de projeto a partir da solução simplificada de um arco isostático tri-articulado, dados pelas expressões [3] e [4], sendo este arco submetido apenas à carga gravitacional.

$$N_d = \frac{1,4 \cdot (0,0025 \cdot d \cdot C_{arco} + q_{sc} \cdot L)}{-10,38 \cdot \left(\frac{f}{L} \right)^4 + 29,56 \cdot \left(\frac{f}{L} \right)^3 - 29,79 \cdot \left(\frac{f}{L} \right)^2 + 11,22 \cdot \left(\frac{f}{L} \right) - 0,12} \quad [3]$$

$$M_d = \frac{1,4 \cdot (0,0025 \cdot d \cdot C_{arco} \cdot L + q_{sc} \cdot L^2)}{12350 \cdot \exp\left(-17,93 \cdot \frac{f}{L}\right) + 534 \cdot \exp\left(-2,61 \cdot \frac{f}{L}\right)} \quad [4]$$

De forma simplificada, foram considerados o esforço normal resistente na base do arco como sendo uma compressão simples [5] e o momento fletor resistente no primeiro quarto do vão, considerando o caso de flexão simples [6] (NBR6118,2003).



$$N_{dRES} = (0,071 \cdot f_{ck} + 0,087) \cdot d \quad [5]$$

$$M_{dRES} = 0,0001291 \cdot f_{ck} \cdot d^2 \quad [6]$$

Nas expressões de [3] a [6], d é a espessura da casca em metros, q_{sc} a sobrecarga sobre a casca em KN/m², e f_{ck} a resistência característica do concreto em KN/m².

O domínio definido para estes parâmetros foram valores que variam de 10 a 50 metros para o vão, com intervalos de 5 metros; variações de 0,1 a 1,0 para a relação (f/L), com incrementos de 0,1; Resistência à Compressão (f_{ck}) com valores de 20 a 50 MPa, considerando incrementos de 5 MPa.

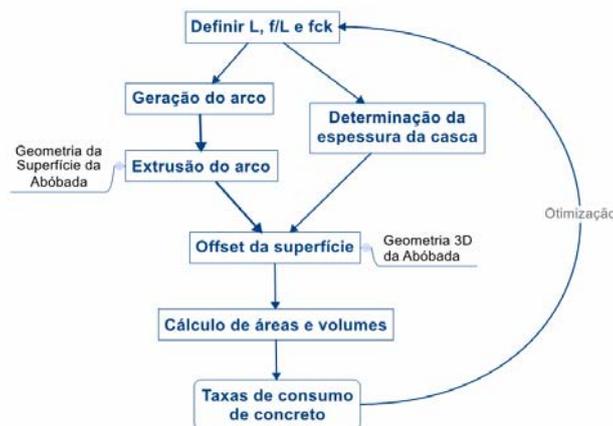
A obtenção da forma pré-dimensionada da estrutura para cada incremento de vão foi dada pela satisfação da condição de capacidade resistente da peça, satisfazendo a condição de que a solicitação de projeto deve ser inferior a resistência de projeto: $S_d \leq R_d$ (NBR6118,2003). Assim, substituindo [5] em [3] e [6] em [4], obtém-se as espessuras mínimas da casca segundo a condição do esforço normal máximo (Eq. [7]) e segundo o momento fletor máximo (Eq. [8]), respectivamente.

$$d_{EN} \geq \frac{14 \cdot (0,0025 \cdot d \cdot C_{arco} + q_{sc} \cdot L)}{\left[-10,38 \cdot \left(\frac{f}{L}\right)^4 + 29,56 \cdot \left(\frac{f}{L}\right)^3 - 29,79 \cdot \left(\frac{f}{L}\right)^2 + 11,22 \cdot \left(\frac{f}{L}\right) - 0,12 \right] \cdot (7,14 \cdot f_{ck} + 8,69)} \quad [7]$$

$$d_{MF} \geq \frac{14 \cdot (0,0025 \cdot d \cdot C_{arco} \cdot L + q_{sc} \cdot L^2)}{\left[12350 \cdot \exp\left(-17,93 \cdot \frac{f}{L}\right) + 534 \cdot \exp\left(-2,61 \cdot \frac{f}{L}\right) \right] \cdot 0,0129 \cdot f_{ck}} \quad [8]$$

A concatenação destas informações descritas em um algoritmo forma o algoritmo gerativo que se objetiva fazer. A figura 2 ilustra este algoritmo proposto esquematizado em um diagrama de blocos.

Figura 2 – Esquema do algoritmo gerativo proposto.



Fonte: produzido pelos autores.

Observa-se na figura 2 a proposta de um loop de otimização entre a obtenção das taxas de concreto e a definição dos parâmetros de entrada, podendo-se obter a configuração ótima de modo que minimize a quantidade de concreto.

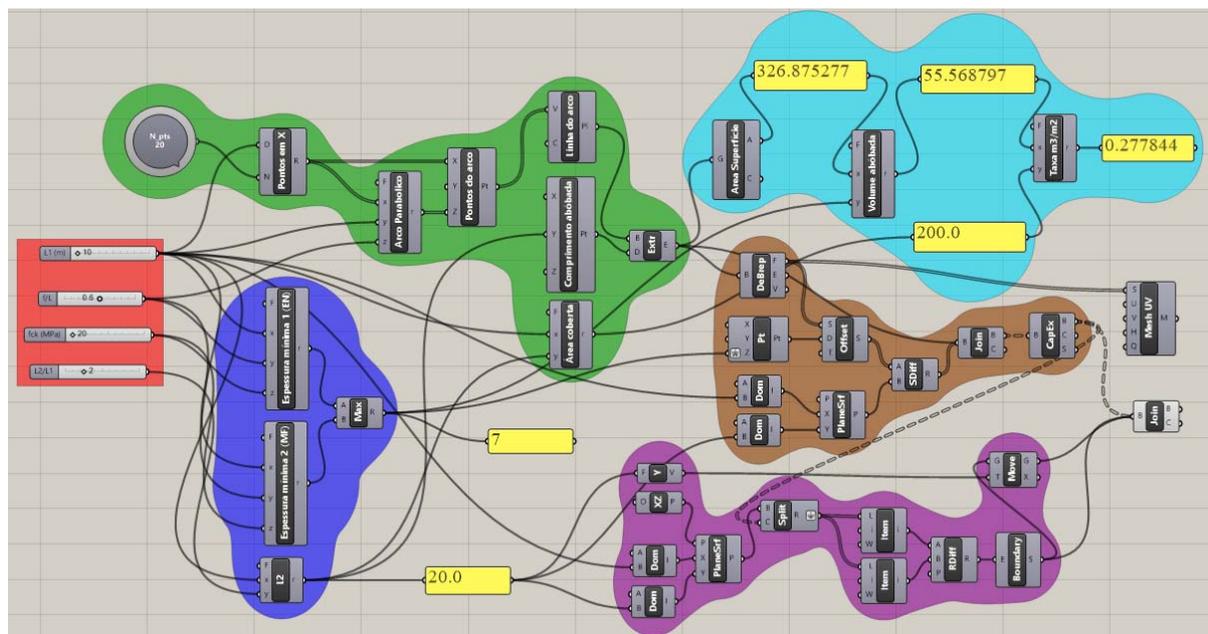


3 RESULTADOS

Adaptando o algoritmo esquematizado na figura 2 para a linguagem do Grasshopper, obtém-se o algoritmo generativo da abóbada em casca de concreto parametrizada em função do vão do arco, razão f/L e resistência característica do concreto.

A figura 3 ilustra a tela do algoritmo gerativo da abóbada com todos os componentes funcionais no ambiente do Grasshopper.

Figura 3 - Algoritmo gerativo proposto implementado no Grasshopper.



Fonte: produzido pelos autores.

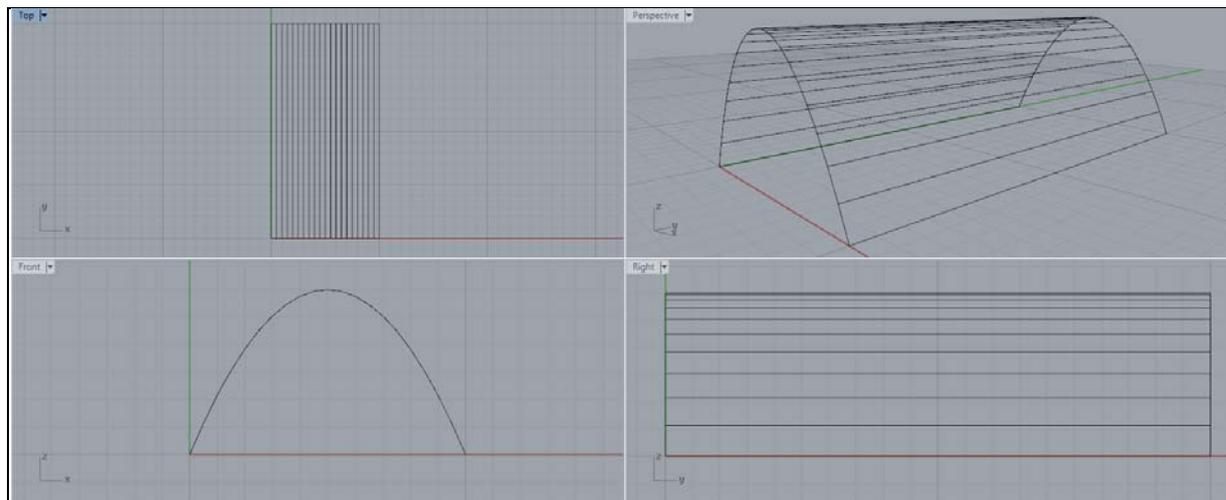
Neste algoritmo implementado, pode-se observar na figura 3 que os componentes funcionais estão agrupados por cores. Em vermelho estão os parâmetros de entrada; em verde os componentes para gerar a forma da superfície da abóbada; em azul os componentes para determinar a espessura da casca de concreto; em marrom a execução do offset da superfície da abóbada de acordo com a espessura da casca; em lilás a junção das duas superfícies da abóbada, gerando a abóbada tridimensional com a sua espessura pré-dimensionada; e em azul ciano o cálculo da taxa de consumo de concreto por área coberta.

Nesta própria tela do algoritmo generativo (figura 3), o projetista já pode verificar em tempo real qual é a espessura pré-dimensionada da casca de concreto e também a taxa de consumo de concreto correspondente à combinação dos parâmetros de entrada.

Outro resultado seria a obtenção da superfície da abóbada que é automaticamente gerada no ambiente do Rhinoceros, como ilustra na figura 4. Esta geometria de casa pode ser utilizada para se realizar simulação e projeto estrutural da casca em qualquer software de análise estrutural 3D de cascas através da extensão *dxfl*.



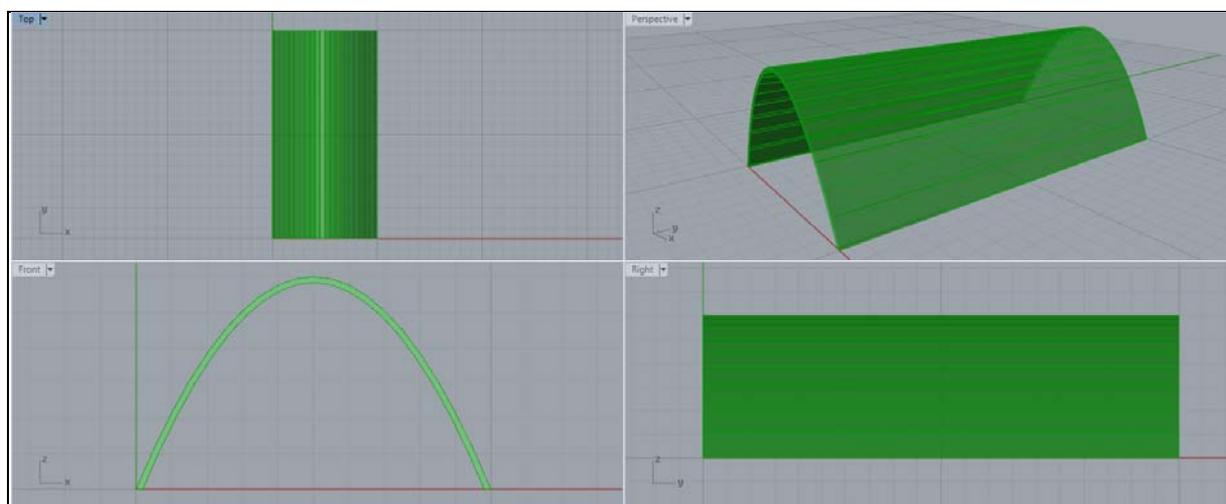
Figura 4 - Geometria da superfície da abóbada gerada no Rhinoceros.



Fonte: produzido pelos autores.

A geometria 3D da abóbada em casca considerando sua espessura, gerada pelo algoritmo gerativo implementado no Grasshopper, também é automaticamente gerada no ambiente do Rhinoceros. Esta, ilustrada pela figura 5, pode ser útil na verificação da proporção entre a espessura e as outras dimensões da casca, como também de geometria gerada a ser incluída em um contexto BIM.

Figura 5 - Geometria completa tridimensional da abóbada gerada no Rhinoceros.



Fonte: produzido pelos autores.

4 CONCLUSÕES

Foi proposto neste artigo uma formulação analítica que define a espessura pré-dimensionada de uma abóbada em arco parabólico de concreto armado para ser utilizada em um algoritmo gerativo paramétrico. Esta formulação foi utilizada para conceber um algoritmo gerativo de uma abóbada de arco parabólico em casca de concreto armado, tendo por objetivo auxiliar o processo de concepção deste sistema estrutural.



Este algoritmo gerativo pode também ser utilizado para investigações de parâmetros de entrada ótimos desta abóbada. Isto pode ser feito com objetivo de diminuir a taxa de consumo de concreto de acordo com a conjuntura de dimensões do sistema e valor da resistência característica do concreto.

A mesma lógica utilizada neste algoritmo gerativo pode ser utilizada para abóbadas com outras funções que venham a definir o arco, como a circunferência ou até polinômios com maiores graus do que o quadrático. Isto pode ser realizado substituindo as funções que definem a forma e a espessura do arco.

O algoritmo gerativo proposto também oferece ao usuário uma experiência sobre a proporção da espessura estrutural em relação ao vão, relacionando a micro e a macro dimensão do sistema estrutural. Isto proporciona em tempo real para o projetista uma visualização importante sobre as proporções geométricas durante as fases iniciais do processo de projeto.

Além disto, esta visualização em tempo real da relação entre a espessura estrutural e o vão do sistema pode ser um valioso instrumento didático, dando noção ao aprendiz sobre as dependências das variáveis que protagonizam o funcionamento do sistema estrutural.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a instituição da UFBA pelos recursos os quais viabilizam e dão apoio à pesquisa do tema deste artigo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projetos de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

KHABAZI, Z. **Generative Algorithms using Grasshopper**. Morphogenesisism, 2012. Disponível em: <<http://www.morphogenesisism.com>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. New York: Spoon Press, 2003. 441p.

CELANI, **Maria Gabriela Caffarena**. Algoritmos evolutivos como método para desenvolvimento de projetos de arquitetura, 2015.

CELANI, **Maria Gabriela Caffarena**, Estudo De Otimização De Coberturas Responsivas À Insolação Através Da Parametrização. ENTAC, 2014.

MITCHELL, **William J**. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. 1970.