



Tema: projeto - arquitetura e engenharia

PROCESSO ITERATIVO DE DESIGN PARAMÉTRICO E ANÁLISE ESTRUTURAL APLICADO AO DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA PARA TORRE DE ENERGIA EÓLICA *

Marina Ferreira Borges¹

Ricardo Hallal Fakury²

Afonso Henrique Mascarenhas de Araújo³

Resumo

Este trabalho propõe-se a estudar o processo de design paramétrico integrado à análise e dimensionamento estrutural. Esse modelo de aplicação é chamado de Modelo Performativo, onde a forma é gerada com base em critérios de desempenho. Nesta metodologia, a forma é o resultado de um trabalho colaborativo entre arquitetos e engenheiros. Para tanto, utilizam-se as ferramentas digitais como facilitadoras do fluxo de informações entre os projetistas através de softwares de modelagem paramétrica e análise pelo Método dos Elementos Finitos. Para investigação do Modelo Performativo, propõe-se o desenvolvimento de uma estrutura conceitual de uma torre treliçada de energia eólica com o objetivo de otimizações quantitativa e qualitativa da estrutura. Será feita a modelagem paramétrica utilizando o software *Rhinoceros*, o plugin para criação de algoritmos *Grasshoper* e o *plugin* de análise estrutural *Scan&Solve*, escolhas feitas sob o critério da interoperabilidade.

Palavras-chave: Modelo Performativo; Modelagem paramétrica; Análise por Elementos Finitos; Torre Eólica Treliçada.

ITERATIVE PROCESS OF PARAMETRIC DESIGN AND STRUCTURAL PROJECT APPLIED TO THE DEVELOPMENT OF WIND TOWER

Abstract

This article proposes to study the process of parametric design integrated analysis and structural design. This application model is called Performative Model; the form is generated based on performance criteria. In this methodology, the shape is the result of a collaborative work between architects and engineers. The digital tools facilitate the information flow between designers using parametric model and Finite Element Analysis. To research the method of Performative Model is proposed the development of a conceptual framework of Lattice Wind Tower with the aim of a quantitative and qualitative structure optimization. Therefore, the parametric modeling will be done using *Rhinoceros* software, the plugin for creating algorithms *Grasshoper* and structural analysis plugin *Scan & Solve*, choices made under the criterion of interoperability.

Keywords: Performative Model; Parametric Model; Finite Element Analysis; Lattice Wind Tower.

¹Arquiteta e Urbanista e Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

²Engenheiro Civil, Dr., Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³Engenheiro Civil, Gerente de Tubos Estruturais da Vallourec Tubos do Brasil S. A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias digitais tem possibilitado mudanças significativas nos processos de projeto de Arquitetura, Engenharia e na indústria da construção. A tecnologia CAD (*Computer Aided Design*) permitiu o desenvolvimento de técnicas de representação 2D e 3D em ambiente digital e a tecnologia BIM (*Building Information Modeling*) significou o acréscimo de informações aos modelos através de relações paramétricas. Até então as tecnologias CAD e BIM continuam associadas a um processo tradicional de projeto, onde existe uma sequência de decisões que envolvem síntese da forma arquitetônica e posterior avaliação, no caso do projeto de estruturas, através de análise estrutural. Numa abordagem contemporânea para o desenvolvimento do projeto de estruturas, a sequência de decisões de projeto parte da estrutura e do material, para posteriormente ser definida a forma. Esta abordagem foi denominada por Oxman e Oxman [1] como *Novo Estruturalismo*, onde o desenvolvimento de estruturas complexas só é possível com a reversão no modo de pensar o processo de geração da forma. Desta maneira, a participação do engenheiro estrutural deixa de ser somente na fase de avaliação e aparece nos primeiros estágios de geração da forma, criando um processo de pesquisa e produção do conhecimento comum entre arquitetos e engenheiros.

Para tanto, será investigada a metodologia abordada por Kolarevic [2] com Modelo Performativo baseado na otimização da forma, onde serão aplicadas ferramentas de design paramétrico ou generativo, cuja elaboração e manipulação têm como plataforma as ferramentas digitais. O Modelo Performativo se caracteriza pela colaboração entre arquitetos e engenheiros estruturais desde o princípio do processo. Para exploração e representação do projeto é utilizada a modelagem paramétrica; e na transmissão do modelo para a análise, o critério da interoperabilidade (capacidade de troca de dados entre aplicativos computacionais) é fundamental para facilitar a iteratividade. O processo de análise estrutural é incorporado na metodologia de concepção, onde a participação do engenheiro se inicia desde os primeiros passos de geração da forma. Nesta abordagem, que tem como base de desenvolvimento o desempenho, as estratégias qualitativas e quantitativas são racionalizadas, e a relação entre material, estrutura e forma resulta em uma estética intrinsecamente relacionada com os princípios éticos de economia e eficiência [3].

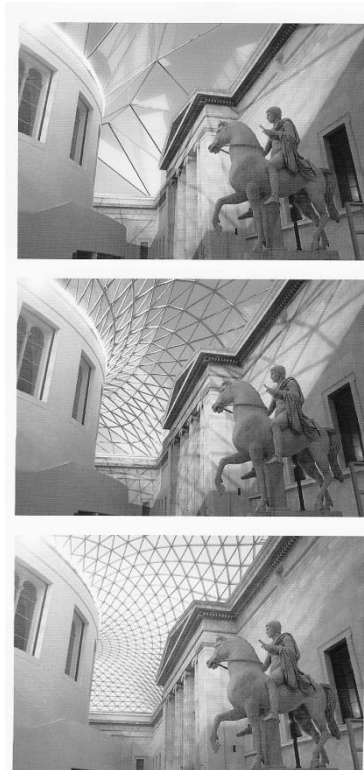
A literatura fornece exemplos de processos de projetos baseados em Modelos Performativos tais como o desenvolvimento da cobertura de vidro do *British Museum* em Londres e a concepção do *Melbourne Stadium* na Austrália.

A cobertura de vidro do *British Museum* em Londres [4] foi concebida pelo escritório de arquitetura Foster + Partners. Sua definição geométrica consistiu de duas partes: a primeira, na definição da forma da superfície; e a segunda, no desenvolvimento do padrão da estrutura metálica sobre a superfície. Para a concepção da forma, foi necessária a criação de uma fórmula matemática que garantisse a singularidade da curvatura da superfície no contorno, já que a cobertura seria executada em um edifício histórico existente.

A segunda parte foi a geração de um padrão da estrutura metálica sobre a superfície, que produziu uma triangulação das faces. O grid triangular foi escolhido por causa da sua eficiência

estrutural, e porque evita a necessidade de produzir painéis de vidro curvos. O grid foi “relaxado” na superfície para remover discontinuidades na curvatura geodésica, movendo cada nó para um ponto na superfície igual à média ponderada dos seus vizinhos.

Figura 1: Simulações computacionais de subdivisão da cobertura



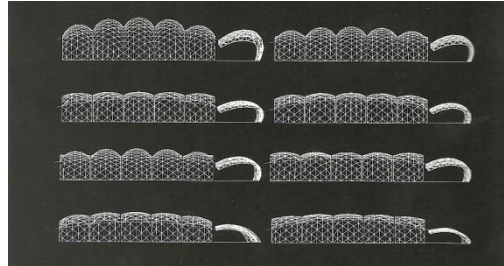
Fonte: BURRY, 2010

Durante o processo de divisão de cada face da malha para um número de faces menores, foi se ajustando as coordenadas dos vértices criados e uma representação de malha mais fina foi produzida (Fig. 1). Uma vez encontrada a forma, foram aplicados algoritmos de otimização, o que permitiu manipular a malha original de controle e testar geometricamente diferentes opções do grid estrutural em termos de critérios de desempenho e eficiência estrutural, conforto termo-acústico e economia.

Na concepção do *Melbourne Stadium* na Austrália, foi feita a combinação de parâmetros de sustentabilidade e considerações funcionais e estruturais. A estrutura da cobertura é uma cúpula geodésica em parte esférica, concebida com base em uma rede de grandes círculos que se cruzam para formar os elementos triangulares estáveis de uma malha estrutural (Fig. 2).



Figura 2: variantes paramétricas na secção da cúpula e a curva sobre o qual se situam as cúpulas



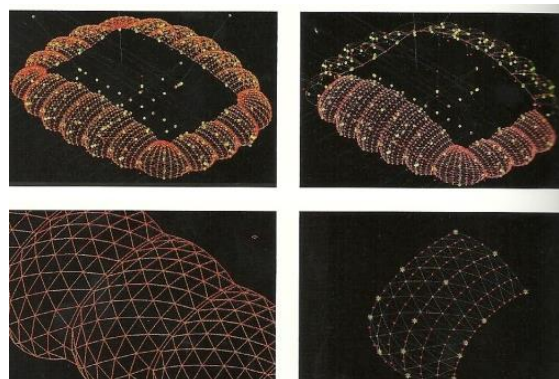
Fonte: BURRY, 2010

A forma da cobertura tira partido das eficiências estruturais inerentes de uma cúpula para criar um conjunto surpreendentemente leve de aço. O refinamento da proposta inicial foi desenvolvido por arquitetos e engenheiros do escritório Arup, determinada por critérios estéticos e econômicos. A forma ótima da estrutura encontrada deveria satisfazer a todos os critérios, incluindo o estudo de iluminação e a facilidade de fabricação das peças.

A modelagem geométrica flexível foi acompanhada de análise estrutural e rotinas de otimização atribuídas às peças de aço da estrutura em resposta à análise iterativa. A cada peça de aço foi atribuída uma dimensão de seção ideal, o que foi posteriormente revisto dentro do processo automatizado computacional para o tamanho mais próximo em conformidade com os perfis disponíveis comercialmente.

A transferência de informação a partir dos modelos geométricos para a análise estrutural e processo de otimização, puderam ser automatizados de tal maneira que se tornou possível investigar diversas formas de concepção e diferentes configurações em um curto período de tempo. A equipe podia alterar a forma e observar os efeitos de diferentes curvaturas, da quantidade de aço utilizado e a eficiência de toda a estrutura. As ferramentas permitiram a alteração da forma, e a análise poderia ser visualizada através da geometria e da cor na tela, promovendo a comunicação rápida entre engenheiros e arquitetos (Fig. 3).

Figura 3: alterações na curvade varredurada cobertura conforme desenvolvimento do projeto.



Fonte: BURRY, 2010

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Experimentação do modelo

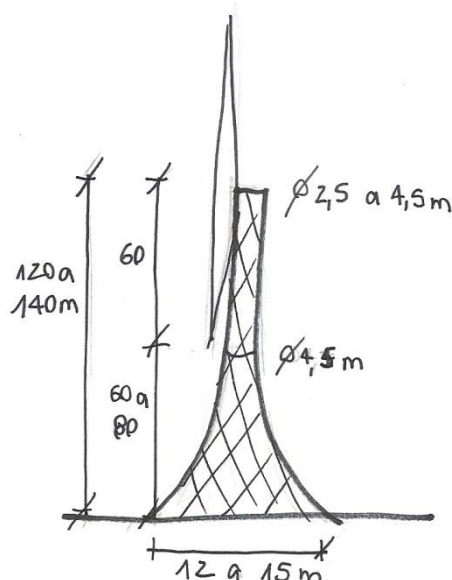
Como objeto de estudo e experimentação para aplicação da metodologia de Modelo Performativo, propõe-se a concepção da estrutura de uma torre treliçada de energia eólica. Para o desenvolvimento da forma serão aplicados os principais parâmetros que classificam estes modelos que são: geometria, forças usadas na geração da forma, técnicas, ferramentas, interoperabilidade e colaboração entre profissionais de arquitetura e engenharia.

2.1.1 Geometria

O Modelo Performativo se inicia dentro de um espaço de restrições. Para a geração da forma da torre de energia eólica, as restrições geométricas seriam em função da altura, largura de base e topo, material e configuração da estrutura.

Esta estrutura conceitual (Fig. 4) tem como parâmetros de altura a necessidade de variar entre 120 a 140 metros, de tal forma a aproveitar a capacidade máxima do vento incidente nas turbinas. Como definição da base, tem-se a princípio uma variação de diâmetro de 12 a 15 metros. A 80 metros de altura, o diâmetro deve estar fixado em torno de 4,5 metros e a partir deste ponto, a estrutura deverá manter uma angulação de aproximadamente 90 graus em função do funcionamento das pás.

Figura 4: croqui com definições preliminares da geometria da torre

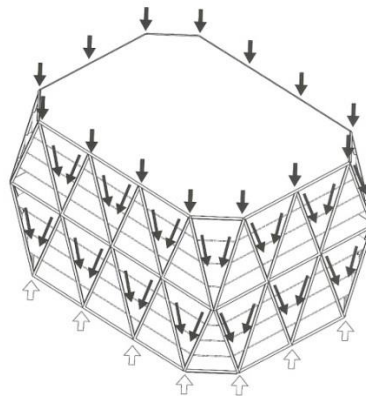


Fonte: Elaborado pelos autores

Optou-se por adotar da estrutura treliçada de aço, principalmente por causa de sua facilidade de transporte para locais de difícil acesso e montagem nesses locais, mas também devido à sua capacidade de responder a momento fletor em vários eixos, necessária em formas verticais onde forças laterais e cargas verticais excêntricas atuam simultaneamente (Fig. 5). A estrutura treliçada pode distribuir as cargas nas direções vertical e lateral (horizontal). São transmitidos

às barras forças axiais de tração e compressão [5]. Sendo assim, a estrutura se torna capaz de receber forças e transmiti-las aos apoios. Além disto, a treliça espacial permite a variação geométrica ao longo de um eixo vertical possibilitando inúmeras variações com relação ao design, aos perfis e conseqüentemente de resistência às solicitações. As variações podem ser nas seções horizontais e no dimensionamento dos perfis ao longo da seção vertical, atendendo à mudança de solicitação, no intuito de se otimizar a estrutura.

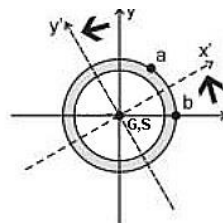
Figura 5: Distribuição de cargas em estrutura treliçada



Fonte: MOUSSAVI, 2009

Para as barras da estrutura, foram escolhidos perfis laminados tubulares circulares fabricados no Brasil pela Vallourec [6]. Isso se deve principalmente ao fato de a seção circular ter melhor capacidade resistente à instabilidade quando submetida à compressão, comparada às outras seções, tendo em vista ser axissimétrica e ter o centro geométrico (G) coincidindo com o centro de cisalhamento (S) (Fig. 6).

Figura 6: Coincidência do centro geométrico (G) e do centro de cisalhamento (S) e simetria radial das seções tubulares circulares



Fonte: Elaborado pelos autores

2.1.2 Forças

A forma da torre tem aspectos quantitativos e qualitativos que guiam sua geração. O aspecto quantitativo são as forças atuantes, que, simplificada, se dividem em peso próprio da estrutura, forças devido ao equipamento (aerogeradore), incluindo o efeito do vento nas pás, e força de vento na estrutura. As forças devidas ao equipamento serão estimadas em função de sua potência, da ordem de 3 MW, e as forças de vento na estrutura serão determinadas, de modo simplificado, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 6123:1988 [7]. Serão



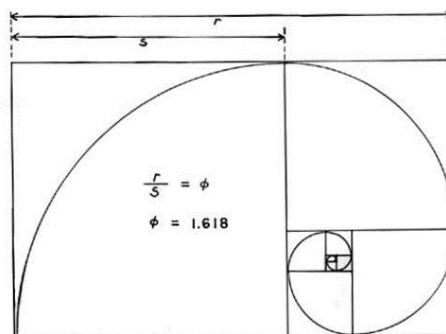
avaliados apenas as tensões atuantes, de modo que não ocorra colapso, e os estados deslocamentos máximos. O efeito de fadiga, e exigências relacionadas à frequência natural não será consideradas.

O aspecto qualitativo considerado é relativo à estética da torre. A princípio este não seria um dado parametrizável através de dados numéricos, mas através de um pensamento racionalista, pode-se recorrer à Geometria Descritiva utilizando medidas de proporção da Razão Áurea [8] e do estudo de superfícies regradas como o hiperboloide de uma folha.

2.1.2.1 Razão Áurea

A Razão Áurea (Fig. 7) é um princípio de proporção extraído da Sequência de Fibonacci, que é considerada a proporção do corpo humano. Desde a Antiguidade é usada na arte, tendo tido no Renascimento seu apogeu, tendo sido muito utilizada nas obras de Leonardo Da Vinci. No Modernismo, Le Corbusier baseou-se na proporção áurea para criação do *Modulor*, que teve sua aplicação em diversos edifícios emblemáticos do período.

Figura 7: Razão Áurea



Fonte: LIVIO, 2006

O número áureo é aproximado pela divisão do *n*ésimo termo da Série de Fibonacci (0, 1,1,2,3,5,8,13,21,34,55,89,..., na qual cada número é a soma dos dois números imediatamente anteriores na própria série) pelo termo anterior. Isto resulta em um número constante de aproximadamente 1,618.

2.1.2.2 Hiperboloide de uma folha

Para disposição geométrica da forma da torre e distribuição de barras, foi adotada a geometria do hiperboloide de uma folha (Fig. 8). Esta superfície apresenta vantagens estruturais e tem sido utilizada em obras de engenharia e arquitetura desde o século XIX. Estas superfícies possuem uma característica favorável à estabilidade: em cada um de seus pontos há duas retas distintas que cruzam a superfície. Esta característica mantém a integridade estrutural com a redução do uso de materiais.




Figura 8: Hiperboloide de uma folha

Fonte: RODRIGUES, 2012

As aplicações dos hiperboloides de uma folha na arquitetura estão associadas às experimentações do engenheiro e arquiteto russo Vladimir Shukhov. Ao estudar o design de formas, ele deduziu matematicamente uma família de equações que correspondia a características dos hiperboloides. Estas superfícies duplamente regradas permitem a construção de malhas com vigas retilíneas, o que simplifica os trabalhos. Um exemplo de aplicação de hiperbolóides de uma folha por Shukhov é a Torre Shabolovka, uma torre de transmissão de energia com 160 metros de altura, construída em Moscou em 1920 [9].

A construção de outras torres configuradas em hiperboloide de uma folha também serviu como referência da pesquisa. A Torre de Kobe no Japão é também uma torre de transmissão e é utilizada como ponto de observação, além de representar um marco urbano na cidade de Kobe. A Torre de Canton também constitui um marco urbano para a cidade de mesmo nome na China. É uma torre de televisão multiuso e até a data de sua construção era considerada a torre mais alta do mundo. Seu projeto pode ser considerado um exemplo de Modelo Performativo, visto que a estrutura foi resultado de um processo colaborativo entre os arquitetos holandeses Mark Hemel e Barbara Kuit com o escritório de cálculo estrutural Arup. A forma foi desenvolvida com o auxílio de ferramentas digitais de design paramétrico, de tal maneira a se buscar a otimização da estrutura.

Quadro 1: Torres construídas com hiperboloide de uma folha

Torre Shabolovka	Torre de Kobe	Torre de Canton
País: Rússia	País: Japão	País: China
Ano de construção: 1920	Ano de construção: 1963	Ano de construção: 2009
Altura: 160 metros	Altura: 108 metros	Altura: 488 metros
		

Fonte: Elaborado pelos autores

2.1.3 Técnicas

As técnicas utilizadas para geração da forma da torre serão a modelagem paramétrica e análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) através de ferramentas computacionais.

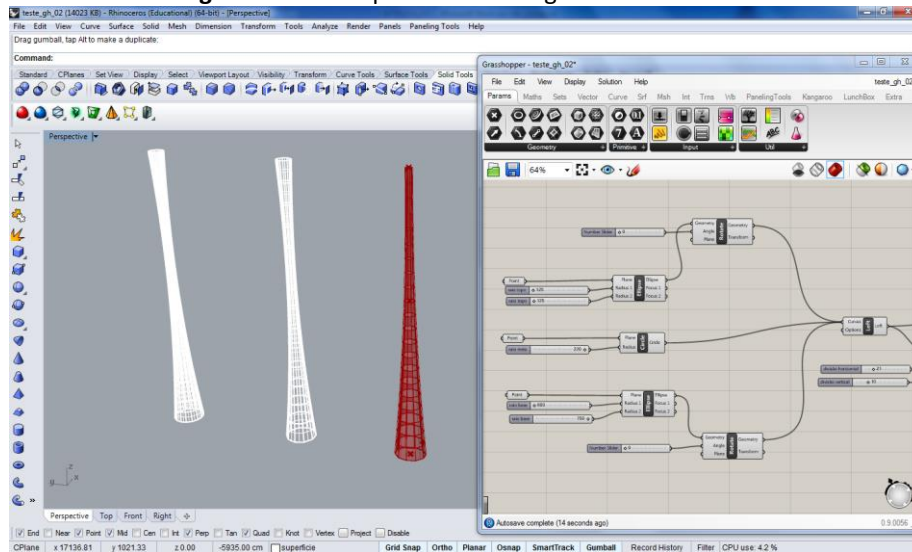
2.1.3.1 Modelagem Paramétrica

Nos Modelos Performativos, a modelagem paramétrica é utilizada principalmente para representação e geração da forma, e está ligada aos mecanismos de otimização e geração. A modelagem paramétrica refere-se à automação de parâmetros baseada na geração de elementos. O método de geração das formas deve ser programado através de algoritmos e da definição das variáveis. Mudando os parâmetros, o design pode ser facilmente controlado e os elementos componíveis da forma são automaticamente redesenhados. A programação de elementos paramétricos pode ser influenciada por diversas variáveis envolvidas no projeto como aspectos estéticos, estruturais e ambientais. No modelo da torre os algoritmos estabeleceram restrições devidas à geometria e aos aspectos de força quantitativos e qualitativos.

2.1.3.1.1 Aplicação da modelagem paramétrica no estudo da torre eólica

No estudo da torre de energia eólica, ter-se-ão duas etapas de geração e análise do modelo paramétrico. Na 1ª etapa, a estrutura será modelada como casca (Fig. 9) com geometria hiperboloide de espessura constante, onde serão testados diversos modelos, variando os diâmetros de base e topo, a espessura da casca e sua geometria. Como método de avaliação, estes modelos serão submetidos à análise pelo MEF. Após a avaliação de alguns modelos, será selecionada a forma que melhor atenda aos critérios estáticos e estéticos.

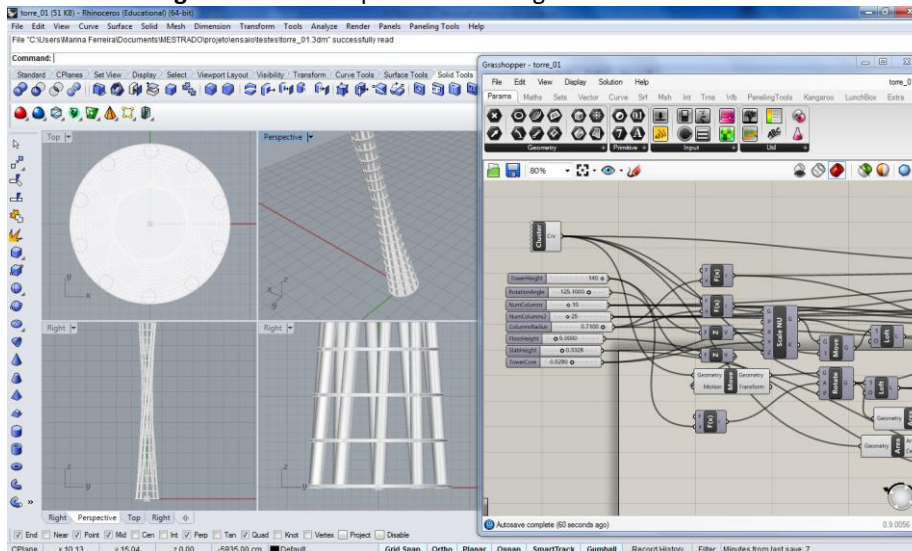
Figura 9: Modelo paramétrico de geometria da casca



Fonte: Elaborado pelos autores

Na 2ª etapa, após a definição da melhor forma em casca da estrutura, será feito o teste com barras (Fig. 10). Para isto, serão aplicadas as definições de barras, moduladas nos sentidos vertical, horizontal e inclinadas. Na vertical, foram definidos que seriam distribuídas de 8 a 16 colunas no perímetro do círculo da base, e estas barras seriam contínuas até o topo, com a mesma quantidade de barras no sentido oposto (princípio do hiperboloide). Na horizontal, a modulação das chapas de travamento da estrutura estaria a princípio com modulação constante, mas esta condição é uma predefinição que pode ser alterada em decorrência das solicitações das cargas e forças atuantes. Barras inclinadas (diagonais) podem ser necessárias para estabilizar adequadamente a estrutura.

Figura 10: Modelo paramétrico de geometria com barras.



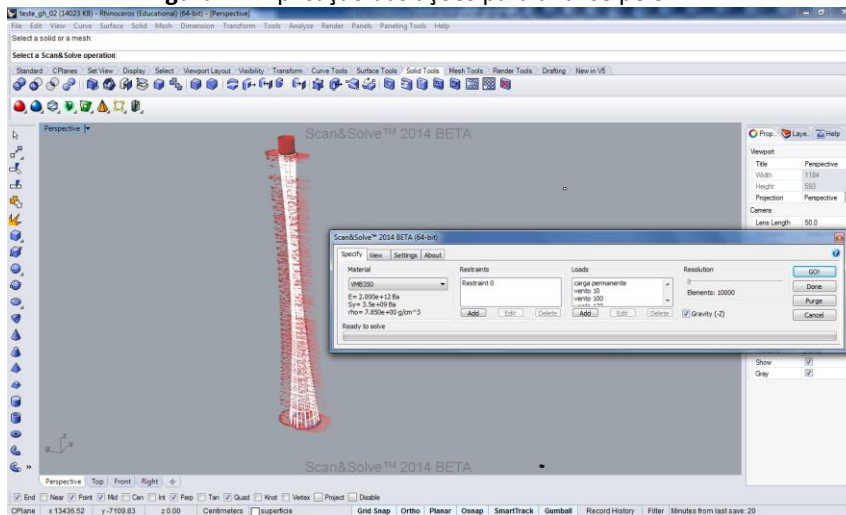
Fonte: Elaborado pelos autores



2.1.3.2 Análise por Elementos Finitos

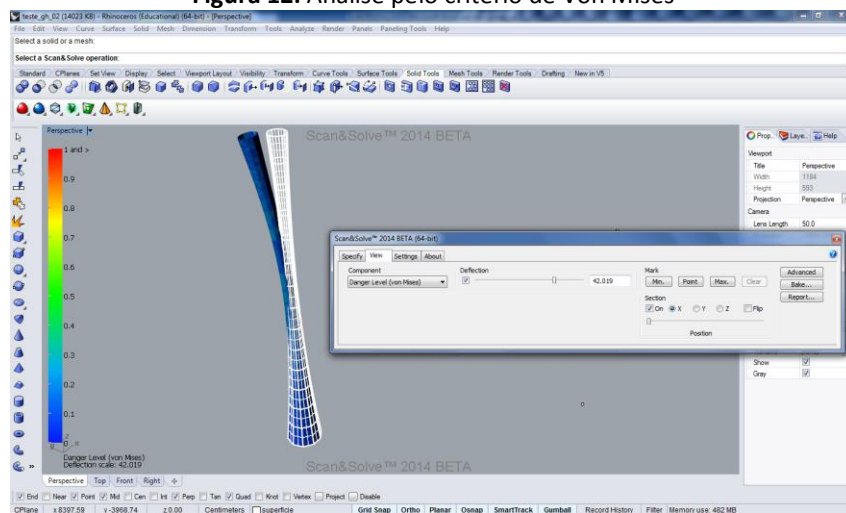
Para avaliação da forma, tanto na 1ª, quanto na 2ª etapa, os modelos serão analisados pelo MEF sob o critério de Von Mises. Para tal, serão aplicadas as mesmas forças de equipamentos, o peso próprio da estrutura e as forças de vento (figuras 11, 12 e 13). O aço estrutural de referência para a análise será o VMB-350, que possui resistências ao escoamento e à ruptura de 350 MPa e 485 MPa, respectivamente.

Figura 11: Aplicação das ações para análise pelo MEF



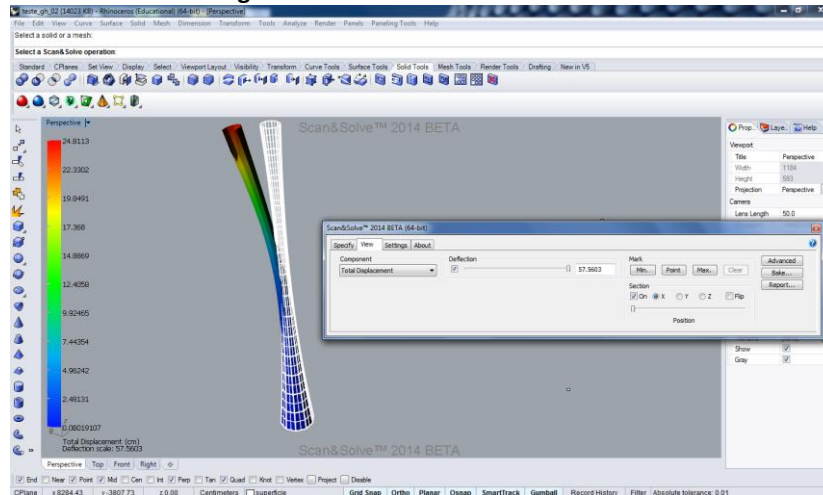
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 12: Análise pelo critério de Von Mises



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 13: Análise dos deslocamentos



Fonte: Elaborado pelos autores

2.1.3.3 Ferramentas computacionais

Para a geração da estrutura tridimensional, foi escolhido o software *Rhinceros*, por este possibilitar a modelagem tridimensional baseada na tecnologia *Nurbs*, que permite a construção de geometrias curvas e superfícies. O programa foi desenvolvido para ser um *plugin* do programa *AutoCad*, mas rapidamente tornou-se um aplicativo independente. Por suas possibilidades de modelagem, é um programa amplamente utilizado em design e engenharia mecânica.

A principal vantagem do *Rhinceros* é a infinidade de *plugins* que estão sendo desenvolvidos para ele. O *plugin* mais popular para o desenvolvimento de design generativo é o *Grasshoper*, disponibilizado gratuitamente por seus desenvolvedores. Sua interface funciona através de diagramas, onde são desenvolvidos parâmetros, e estes resultam em formas na interface do *Rhinceros*. Os parâmetros vão sendo modificados interativamente com a visualização dos modelos tridimensionais.

As figuras 09 e 10 mostram o desenvolvimento do modelo da torre no *Rhinceros* juntamente com o *Grasshoper*. Na primeira tela, foram definidos no *Rhinceros* pontos que determinam a geometria a ser seguida pela estrutura. À direita da tela, foram estabelecidos os parâmetros de geração da forma através do diagrama do *Grasshoper*. As telas seguintes mostram os testes de parâmetros e seus resultados na geometria da estrutura. Neste caso, os parâmetros eram referentes à curvatura da estrutura, ao espaçamento e seção transversal das barras.

Para a análise estrutural, será utilizado o *plugin Scan&Solve* para *Rhinceros* (figuras 11, 12 e 13) que tem sua base de funcionamento nos sólidos tridimensionais gerados por este programa. O *Scan&Solve* pode ser aplicado em todos os problemas de MEF, incluindo transferência de calor, elasticidade, vibração natural, torção, etc. Para a análise, é necessário que se tenha um sólido modelado, onde primeiramente se seleciona o material, seleciona as restrições da estrutura, aplicam-se os carregamentos (ponto de aplicação no modelo e valores) e adota-se o critério de dimensionamento, que no caso será ao limite de tensões ao valor de Von Misses.



A vantagem de se utilizar os plug-ins *Grasshoper* e *Scan&Solve* é a interoperabilidade, tendo sua base de funcionamento no programa *Rhinoceros*, evitando que o sólido seja exportado para outro programa e haja a necessidade de readaptação da malha.

2.1.3.4 Interoperabilidade

No processo de desenvolvimento da torre eólica serão testadas diversas geometrias, com diversas condições de contorno, e a variação de seções transversais de barras. A intenção é que o processo de concepção e análise seja iterativo e que se repitam várias vezes até encontrar dentre as diversas possibilidades uma solução que contemple de forma eficaz. Portanto, é imprescindível que haja interoperabilidade entre as ferramentas utilizadas. Para tanto, a escolha do *Grasshoper* para a parametrização do modelo e do *Scan&Solve* para análise estrutural atendem este requisito devido à base do modelo estar sempre no mesmo ambiente, que seria o programa *Rhinoceros*.

2.1.3.5 Colaboração

A colaboração entre projetistas é fundamental para um processo de Modelo Performativo. A forma passa a ser o resultado de um processo que envolve projetistas de várias especialidades, buscando otimização e desempenho. Desta maneira, a relação de autoria se modifica, não sendo mais o arquiteto o único autor da forma final. Mas ainda assim, o arquiteto mantém o controle conceitual das definições; o que ocorre é uma mudança de filosofia, onde a prioridade está relacionada ao conceito e não ao desenho de uma forma determinística.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados

Até o momento, está sendo desenvolvida a 1ª etapa do trabalho de geração e análise da casca. Já foram detectadas algumas soluções com relação à geometria e a forma de análise. Após a definição da casca, será testado um novo algoritmo para teste de barras similar ao mostrado na figura 10. Espera-se encontrar uma forma ótima no final do processo, mas o principal resultado esperado está em se avaliar a eficiência e a importância do desenvolvimento de um Modelo Performativo na geração de estruturas complexas. A modelagem paramétrica permite a geração de uma infinidade de modelos, ampliando a gama de soluções da forma desenvolvida pelo projetista. Além disto, o processo de avaliação também é ampliado, visto que se podem avaliar várias formas através de análise por Elementos Finitos. A interoperabilidade entre os softwares utilizados tem sido fundamental no processo, devido à facilidade de se gerar e avaliar em um curto período de tempo.

Através da metodologia investigada, espera-se que o processo colaborativo entre engenheiros e arquitetos envolvidos neste projeto gere a melhor estrutura dentre as possibilidades, resultando em uma forma não só esteticamente interessante ou somente estaticamente eficiente, mas o resultado de uma combinação destes dois critérios.



3.2 Discussões

O Modelo Performativo é uma hipótese de desenvolvimento de projetos colaborativos entre arquitetos e engenheiros, tendo as ferramentas digitais como intermediárias do processo. Avanços tecnológicos propiciaram suporte para a geração deste tipo de modelo.

A modelagem paramétrica muda a cultura de geração da forma, uma vez que o conceito formulado pelo arquiteto é mais importante do que a tipologia. As ferramentas digitais exigem dos projetistas cada vez mais conhecimento de softwares e programação. Ao mesmo tempo em que se propõem a ser facilitadoras, também podem gerar entraves no projeto devido à dificuldade de se manipular alguns softwares. Estas dificuldades podem levar ao abandono do processo, mas uma vez superadas, levam a resultados mais eficientes.

Não se pode afirmar que os Modelos Performativos melhorem a solução arquitetônica, pois em muitos casos vistos na literatura pode-se notar que a forma final é muito próxima da forma desejada no início do processo.

Neste trabalho, foi feito um recorte para se estudar Modelos Performativos apenas com relação ao projeto estrutural, mas este processo baseado em desempenho pode ser ampliado para os mais diversos aspectos do projeto, podendo vislumbrar problemas de projeto e antecipar conflitos, encaminhando para soluções mais eficientes e que melhor atendam às questões de desempenho funcional [3].

4 CONCLUSÃO

O projeto performativo é colaborativo, interdisciplinar, multiprocessual e complexo. Esta abordagem de projeto exige uma mudança de cultura entre projetistas. No caso de aplicação ao desenvolvimento de uma forma estrutural, arquitetos e engenheiros devem trabalhar em um processo colaborativo, em que as informações de projeto devam ter seu fluxo facilitado para todos os envolvidos na tomada de decisões. A junção de diferentes disciplinas envolvidas no projeto apresenta melhorias no desempenho da estrutura gerada, o que impacta diretamente em questões relativas ao custo de construção. As tecnologias digitais baseadas em algoritmos propiciam uma facilidade de manipulação da forma da estrutura, o que dentro do processo de avaliação, cria métodos de previsão da forma que permitem a racionalização do conceito através de dados numéricos. Através dos modelos gerados, podem ser avaliados os aspectos de carga, o que permite uma extrapolação da forma, até se atingir os resultados desejados para uma otimização estrutural.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro em forma de fomento à pesquisa concedido pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) no ano de 2013.



REFERÊNCIAS

- 1 OXMAN, R.; OXMAN, R. (Editores Convidados). **The New Structuralism: design, engineering and Architectural Technologies**. In: *Architectural Design*. Wiley, Londres, Jul./Aug. 2010.
- 2 KOLAREVIC, B. **Performative Architecture beyond instrumentality**. Nova Iorque: Spon Press; 2005.
- 3 ANDRADE, Max; RUSCHEL, Regina Coeli. **Projeto Performativo na prática arquitetônica recente: Estrutura Conceitual** [doutorado]. Campinas: Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP; 2012.
- 4 BURRY, Jane; BURRY, Mark. **The New Mathematics of Architecture**. Nova Iorque: Tames & Hudson, 2010.
- 5 MOUSSAVI, Farshid. **The Function of Form**. Nova Iorque: Universidade de Harvard, 2009.
- 6 V&M DO BRASIL. **Tubos Estruturais, Seção Circular, Quadrada e Retangular**. Catálogo disponível <[http://www.vmtubes.com.br/vmbinternet/filesmng.nsf/2F0D885B9F9AC58983257A790050CFB2/\\$File/Catalogo%20de%20Tubos%20Estruturais%202012-2.pdf](http://www.vmtubes.com.br/vmbinternet/filesmng.nsf/2F0D885B9F9AC58983257A790050CFB2/$File/Catalogo%20de%20Tubos%20Estruturais%202012-2.pdf)>. Acesso em: 28 de maio de 2014.
- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- 8 LIVIO, Mario; **Razão Áurea: A História de Fi, um Número Surpreendente**. São Paulo: Ed. Record, 2006.
- 9 RODRIGUES, J.S.; OLIVER, L; NÁPOLES, S. **Formas & Fórmulas**. Universidade de Lisboa, Catálogo de exposição (2012-2013). Lisboa: Museu Nacional de História Natural e da Ciência [s.n], 2012, 118p.