

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas

Marina Ferreira Borges

**DESIGN ESTRUTURAL BASEADO EM DESEMPENHO APLICADO AO
DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA DE TORRE EÓLICA**

Belo Horizonte

2015

Marina Ferreira Borges

**DESIGN ESTRUTURAL BASEADO EM DESEMPENHO APLICADO AO
DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA DE TORRE EÓLICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Ricardo Hallal Fakury

Belo Horizonte

2015

Borges, Marina Ferreira.

B732d

Design estrutural baseado em desempenho aplicado ao desenvolvimento de estrutura de torre eólica [manuscrito] / Marina Ferreira Borges. – 2015.

160 f., enc.: il.

Orientador: Ricardo Hallal Fakury.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Anexos: f.161-172.

Bibliografia: f. 154-160.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Projeto estrutural - Teses. 3. Teoria das estruturas - Teses. 4. Energia eólica - Teses. I. Fakury, Ricardo Hallal. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS Nº: 278 do aluno **Marina Ferreira Borges**.

Às **13:30** horas do dia **18** do mês de **março** de **2015**, reuniu-se, na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, a Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Programa em **22 de dezembro de 2014**, para julgar a defesa da Dissertação de Mestrado intitulada "**Design Estrutural Baseado em Desempenho Aplicado ao Desenvolvimento de Estrutura de Torre Eólica**", cuja aprovação é um dos requisitos para a obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS na área de ESTRUTURAS.

Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, **Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações:

(Aprov./Repr.)

Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury - DEES - UFMG (Orientador) APROVADO
Prof. Dr. José Ricardo Queiroz Franco - DEES - UFMG APROVADO
Profa. Dr. Maria Gabriela Caffarena Celani - UNICAMP APROVADA

Pelas indicações acima, o candidato foi considerado APROVADA, conforme pareceres em anexo.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão.

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 18 de março de 2015.

Ricardo Fakury
Marina Ferreira Borges
Maria Gabriela Caffarena Celani

Observações:

- 1) A aprovação do candidato na defesa da Dissertação de Mestrado não significa que o mesmo tenha cumprido todos os requisitos necessários para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Estruturas;
- 2) Este documento não terá validade sem a assinatura e carimbo do Coordenador do Programa de Pós-Graduação.

Felício Bruzzi Barros
PROF. FELÍCIO BRUZZI BARROS
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Estruturas da E.E. UFMG

Marina Ferreira Borges

**DESIGN ESTRUTURAL BASEADO EM DESEMPENHO APLICADO AO
DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA DE TORRE EÓLICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury

DEES - UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. José Ricardo Queiroz Franco

DEES - UFMG

Profª. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani

UNICAMP

Belo Horizonte, 18 de março de 2015

Escola de Engenharia da UFMG

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade de crescimento pessoal e intelectual que esta experiência me proporcionou. Agradeço aos meus pais e meu irmão que sempre souberam ouvir e me apoiar mesmo que muitas vezes o assunto lhes seja distante. Agradeço pela paciência e pelo amor.

Agradeço aos amigos antigos que de certa forma me afastei durante este período, mas continuam sendo parte importante da minha vida; e aos novos amigos, que chegaram e ajudaram muito nesta caminhada. Agradeço especialmente as colegas de mestrado pelo companheirismo. Agradeço às colegas de trabalho e amigas por terem trago leveza aos meus dias. Agradeço à Beth pelo imenso apoio, pela compreensão e pela amizade.

Agradeço a todos os professores do departamento de Engenharia de Estruturas pelo conhecimento passado e pela dedicação com que conduzem o ofício. Acredito que muitas vezes o amor ao que fazem os leva a decisões controversas, mas estas talvez tenham sido as que mais me fizeram crescer como ser humano e tenham criado em mim um amor igual pela pesquisa.

Agradeço especialmente ao meu orientador, que num ato de fé, aceitou compartilhar comigo a descoberta de novos caminhos. Agradeço por me ajudar a explorar, avaliar, refletir, confiar e concluir. E acima de tudo, agradeço pela amizade.

E por fim, dedico este trabalho ao João, por caminhar ao meu lado, ter me ensinado a sonhar e abraçado meus sonhos como se fossem seus. Sem o seu amor nada seria possível.

RESUMO

Este trabalho propõe-se a estudar o processo de design paramétrico e algorítmico integrado à análise estrutural para a geração de estruturas de geometrias complexas. A metodologia aplicada é chamada de Modelo Performativo ou projeto baseado em desempenho. Para tanto a estrutura é pensada de maneira reversa, sendo a forma gerada por parâmetros de geometria, materiais e forças aplicadas. Através de um trabalho colaborativo entre engenheiros e arquitetos, o processo de projeto se torna um campo exploratório de pesquisa e produção de conhecimento comum entre os profissionais. Sendo assim, a participação do engenheiro estrutural não ocorre somente na fase de avaliação, mas se inicia no estágio inicial de conceptualização e concepção. Como objeto de experimentação do modelo, será desenvolvida a estrutura de uma torre de energia eólica, onde através do software *Rhinoceros*, do plugin *Grasshoper* e de programação em linguagem *VB* será feito um sistema de geração da geometria integrada à análise de tensões através do plugin *Scan&Solve*. A escolha da forma da estrutura será feita através de critérios de desempenho e otimização estrutural.

Palavras-chave: Design estrutural. Arquitetura paramétrica e algorítmica. Análise estrutural. Projeto baseado em desempenho. Torre de energia eólica.

ABSTRACT

This work proposes to study the process of parametric and algorithm design integrating analysis and structural design for the generation of complex geometry structures. This methodology is based on *Performative Model* where the shape is generated using a performance criteria. In the approach the development of complex structures is only possible with the reversal process thinking to generate the form, where was established parameters as geometry, material and loading aspects. In this methodology, the shape is the result of a collaborative work between architects and engineers. Thus, the participation of the structural engineer is no longer only in the evaluation phase and appears in the early stages, creating a process of exploration and production of common knowledge among architects and engineers. To research performance-based design, it is proposed the development of a conceptual lattice wind tower. Thus, a system will be made to generate geometries using *Rhinoceros* software, the plugin *Grasshoper*, and programming language *VB* integrated with stress analysis through the plugin *Scan & Solve*. The form of the structure will be chosen aiming to combine aesthetics with structural optimization.

Keywords: Structural Design. Parametric and Algorithm Architecture. Structural Analysis. Performative Model. Lattice Wind Tower.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Capela da Academia de Cadetes da Força Aérea dos Estados Unidos.....	29
FIGURA 2.2 – Museu Guggenheim de Bilbao.....	31
FIGURA 2.3 – Water pavillion.....	32
FIGURA 2.4 – Composição de arcos de forma convencional (a) e com NURBS (b).....	33
FIGURA 2.5 – Concepção do projeto do pavilhão de verão para o German Architecture Museum.....	34
FIGURA 2.6 – Projeto de Zaha Hadid para Nordpark Cable Railway.....	36
FIGURA 2.7 – Diagrama de Fisher e Herr.....	37
FIGURA 2.8 – Processo algorítmico de projeto para cobertura na área do porto de Birkenhead.....	40
FIGURA 2.9 – Melbourne Stadium.....	44
FIGURA 2.10 – Variantes paramétricas na secção da cúpula e a curva sobre o qual se situam as cúpulas.....	45
FIGURA 2.11 – Alterações na curva de varredura da cobertura conforme desenvolvimento do projeto.....	46
FIGURA 2.12 – Projeto generativo para a competição da Florence New Station (2003).....	47
FIGURA 2.13 – Fórmula matemática desenvolvida para concepção da superfície.....	48
FIGURA 2.14 – Simulações computacionais de subdivisão da cobertura.....	48
FIGURA 2.15 – Ópera de Sydney.....	51
FIGURA 2.16 – Maquete para concepção estrutural da Sagrada Família.....	52
FIGURA 2.17 – Salginatobel Bridge (1930).....	53
FIGURA 2.18 – Estrutura do Exhibition Hall em Turim (1949).....	53
FIGURA 2.19 – Projeto de Félix Candela em Xochimilco, México (1958).....	54
FIGURA 2.20 – Estação Oriente, Lisboa (1998).....	55

FIGURA 2.21 – Estádio de Munique (1972).....	55
FIGURA 2.22 – Reversão na maneira de pensar forma, força, estrutura e desempenho.....	57
FIGURA 2.23 – Edifício Swiss Re Headquarters (2004).....	60
FIGURA 2.24 – Projeto do Centro de Convenções, Tanggu, China (2009).....	62
FIGURA 2.25 – Estudos para a estrutura para da Transbay Tower baseado na derivação matemática do cantilever perfeito desenvolvido por Anthony Mitchell (1904).....	63
FIGURA 2.26 – Padrão estrutural desenvolvido para a Transbay Tower.....	64
FIGURA 2.27 – Estrutura desenvolvida para a Expo Axis 2010 em Shanghai.....	65
FIGURA 2.28 – Processo de desenvolvimento da estrutura.....	66
FIGURA 2.29 – Mediateca de Sendai.....	67
FIGURA 2.30 – Croquis do projeto para a Mediateca de Sendai (a) croqui de Toyo Ito (b) croqui de Mutsuro Sasaki	68
FIGURA 2.31 – Deformação do parâmetro z.....	69
FIGURA 2.32 – Kakamigahara Crematorium.....	70
FIGURA 2.33 – Análise de deformações da cobertura do Kakamigahara Crematorium.....	71
FIGURA 2.34 – Projeto de Arata Isozaki para competição da Florence New Station (2003).....	72
FIGURA 2.35 – Evolução da forma estrutural da Florence New Station.....	73
FIGURA 2.36 – Qatar Nacional Convention Centre (2011).....	74
FIGURA 2.37 – Serpentine Gallery Pavillion (2002).....	75
FIGURA 2.38 – Regra de geração da estrutura.....	75
FIGURA 2.39 – Definição de hierarquia da estrutura.....	76
FIGURA 2.40 – Exposição <i>Marsyas</i> na Tate Modern Turbine Hall (2002).....	78
FIGURA 2.41 – Torre CCTV (2012).....	79

FIGURA 2.42 – Análise de vibração da estrutura.....	79
FIGURA 2.43 – Modelos de pensamento do design.....	80
FIGURA 3.1 – Torre com 3 pás.....	85
FIGURA 3.2 – Evolução dos aerogeradores desde 1985 até 2005.....	85
FIGURA 3.3 – Componentes de um aerogerador de eixo horizontal.....	86
FIGURA 3.4 – Nacele.....	87
FIGURA 3.5 – Forças atuantes na pá do aerogerador.....	88
FIGURA 3.6 – Fundação de torres eólicas.....	90
FIGURA 3.7 – Torres de concreto.....	91
FIGURA 3.8 – Torres de aço.....	92
FIGURA 3.9 – Hiperboloide de uma folha.....	96
FIGURA 3.10 – Torre de Shabolovka.....	96
FIGURA 3.11 – Torre de Kobe.....	97
FIGURA 3.12 – Torre de Canton.....	98
FIGURA 3.13 – Processo de concepção da Torre de Canton.....	98
FIGURA 3.14 – Sistema de distribuição de forças em um Diagrid vertical.....	100
FIGURA 3.15 – Coincidência do centro geométrico (G), centro de cisalhamento (S) e simetria radial das seções tubulares circulares.....	101
FIGURA 3.16 – Perfis tubulares e perfis “c” (a) Compressão em ambos os perfis; (b) Torção em perfil tubular circular; (c) torção em perfil “c”.....	101
FIGURA 3.17 – Sistema de coordenadas global adotado para dimensionamento da torre..	103
FIGURA 3.18 – Ilustração do valor e_c em seção tubular circular.....	105
FIGURA 3.19 – Momento devido à ação do vento no equipamento.....	106

FIGURA 3.20 – Aplicação do M_{res} transformado em binário.....	106
FIGURA 3.21 – Aplicação de F_{Hres} , F_z e M_{res} , no topo da torre.....	107
FIGURA 3.22 – Metodologia <i>Scan&Solve</i>	108
FIGURA 3.23 – Seção tubular para teste no <i>Scan&Solve</i>	110
FIGURA 3.24 – Tensão no tubo para malha de 152100 e 304000 elementos.....	112
FIGURA 3.25 – Encurtamento no tubo para malhas de 152100 e 304000 elementos.....	112
FIGURA 3.26 – Viga bi-engastada para teste no <i>Scan&Solve</i>	113
FIGURA 3.27 – Deslocamento máximo da viga para malha de 152100 elementos.....	115
FIGURA 3.28 – Tensão XX da viga para malha de 152100 elementos.....	115
FIGURA 3.29 – Parâmetros de dimensionamento da casca em <i>Rhinoceros</i> e <i>Grasshoper</i> ..	117
FIGURA 3.30 – Detalhe de variação de parâmetros.....	118
FIGURA 3.31 – Subdivisão da superfície.....	119
FIGURA 3.32 – Transformação da geometria em modelo tridimensional.....	120
FIGURA 3.33 – Aplicação de carregamentos através do <i>Scan&Solve</i>	121
FIGURA 3.34 – Tensões em cada módulo.....	122
FIGURA 3.35 – Tensões em ZZ para malha com 201100 elementos.....	123
FIGURA 3.36 – Combinação de 3 tubos de Ø externo de 355,6, 273 e 168,3 mm.....	127
FIGURA 3.37 - Parâmetros de entrada e saída no código VB.....	132
FIGURA 3.38 – Seleção de quantidade e diâmetro dos tubos.....	133
FIGURA 3.39 – Conexão dos parâmetros da casca com a saída de tubos.....	134
FIGURA 3.40 – Programação de saída dos tubos.....	134
FIGURA 3.41 – Algoritmo completo da estrutura desenvolvido no <i>Grasshoper</i>	135
FIGURA 3.42 – Modelo no <i>Grasshoper</i> e saída da geometria no <i>Rhinoceros</i>	136

FIGURA 3.43 – Aplicações do algoritmo desenvolvido a diversas formas.....	137
FIGURA 3.44 – Transição proposta para soluções com variação de quantidades de tubos..	138
FIGURA 3.45 – Tubos com módulos duplos.....	139
FIGURA 3.46 – Geometria selecionada para desenvolvimento do projeto.....	147
FIGURA 3.47 – Fotomontagem da torre em perspectiva com aerogerador.....	149

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Parâmetros de dimensionamento da torre.....	94
TABELA 3.2 – Propriedades mecânicas do aço VMB-350.....	103
TABELA 3.3 – Resumo de cargas a serem aplicadas na análise por MEF.....	106
TABELA 3.4 – Relação entre tensão máxima e espessura necessária em cada módulo.....	124
TABELA 3.5 – Cálculo da quantidade de tubos necessária em cada módulo para Ø 355,6 mm e t=25mm.....	126
TABELA 3.6 – Cálculo de diâmetro interno dos tubos com a maior espessura.....	128
TABELA 3.7 – Combinação de tubos e quantidade necessária para cada módulo.....	128
TABELA 3.8 – Área da seção transversal dos tubos selecionados.....	129
TABELA 3.9 – Relação área com quantidade de perfis – combinação de 8 e 4 tubos.....	140
TABELA 3.10 – Relação área com quantidade de perfis – combinação de 10 e 5 tubos....	142
TABELA 3.11 – Relação área com quantidade de perfis – combinação de 12 e 6 tubos....	143
TABELA 3.12 – Relação área com quantidade de perfis – 7 tubos.....	145
TABELA 3.13 – Critério de análise das combinações.....	146
TABELA 3.14 – Variação dos perfis em cada módulo para torre com 8 tubos.....	148

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – Modelos de pensamento do design.....	81
QUADRO 3.1 – Comparação entre MEF e <i>Scan&Solve</i>	109
QUADRO 3.2 – Algumas variações de geometrias possíveis com 4 e 8 tubos.....	141
QUADRO 3.3 – Algumas variações de geometrias possíveis com 10 e 5 tubos.....	142
QUADRO 3.4 – Algumas variações de geometrias possíveis com 12 e 6 tubos.....	144
QUADRO 3.5 – Algumas variações de geometrias possíveis com 7 tubos.....	145

LISTA DE DIAGRAMAS

DIAGRAMA 2.1 – Desenho paramétrico.....	38
DIAGRAMA 2.2 – Relação entre conceitos da abordagem de desempenho.....	43
DIAGRAMA 3.1 – Esquema de montagem do algoritmo para estrutura.....	130
DIAGRAMA 3.2 – Condicional para geração geométrica de tubos.....	131

LISTA DE SIMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

A - área da seção transversal da barra

A_c - área da seção de cada módulo da casca

A_t - área da seção transversal de cada tubo

Ba – barye

E - módulo de elasticidade

F - força aplicada

F_{res} – força resultante

F_z – força aplicada no eixo z

I - momento de inércia

L - comprimento da viga

M_C - momento fletor em C

MPa - megapascal

M_{res} – Momento fletor resultante

N - quantidade de tubos equivalente

R_A - reação de apoio em A

R_B - reação de apoio em B

Letras romanas minúsculas

b - base da seção transversal

f_y - resistência ao escoamento do aço

f_{yd} - resistência ao escoamento de projeto

f_{yd} - resistência ao escoamento de projeto

h - altura do perfil

t – espessura da seção da barra

p - carga distribuída

r - raio do círculo

Letras gregas minúsculas

α - ângulo de inclinação dos tubos

χ - coeficiente de flambagem

σ - tensão normal máxima

$\Delta \bar{s}$ - deslocamento máximo

γ_m - densidade do material

$\varnothing$ – diâmetro do círculo

LISTA DE SIGLAS

2D - bidimensional

3D - tridimensional

ABEEÓLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica

AGU - Advanced Geometry Unit

BLOBS - Binary Large Object

C++ - linguagem de programação multi-paradigma desenvolvida com classes (linguagem C)

CAAD - Computer-Aided Architectural Design

CAD - Computer Aided Design

CAM - Computer Aided Manufacturing

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica

Diagrid – Diagonal grid

ESO - Extended Evolutionary Structure Optimization

ITKE - Institute of Building Structures and Structural Design

GA – Algoritmos Genéticos

GSA - Geometric Structural Analysis

MEF – Método dos Elementos Finitos

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NASTRAN - NASA Structural Analysis

NURBS - Non Uniform Rational Basis Spline

OMA - Office for Metropolitan Architecture

PTV – Princípio dos Trabalhos Virtuais

SMG - Specialist Modelling Group

SOM – Skidmore, Owings & Merrill LLP

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
2 PROCESSOS DIGITAIS DE PROJETO ARQUITETÔNICO E ESTRUTURAL BASEADOS NO DESEMPENHO.....	27
2.1 O uso das ferramentas digitais no projeto arquitetônico e estrutural.....	27
2.1.1 Design computacional avançado	33
2.2 Arquitetura paramétrica e algorítmica.....	35
2.2.1 Arquitetura paramétrica.....	36
2.2.2 Arquitetura algorítmica.....	38
2.3 Projeto baseado em desempenho.....	42
2.3.1 Modelo baseado em otimização.....	43
2.3.2 Modelo baseado em geração.....	46
2.4 O novo estruturalismo.....	49
2.4.1 Arquitetura e Engenharia Estrutural.....	49
2.4.2 O novo estruturalismo.....	56
2.5 Processos colaborativos de projeto utilizando ferramentas digitais.....	58
2.5.1 SMG.....	60
2.5.2 SOM.....	61
2.5.3 ITKE.....	64
2.5.4 Mutsuro Sasaki.....	67
2.5.4.1 Método de Análise Sensitiva.....	69
2.5.4.2 Extended Evolucionary Structure Optimization (ESO)	71
2.5.5 AGU.....	74
2.5.6 Cecil Balmond.....	77

3 PROJETO BASEADO EM DESEMPENHO APLICADO AO DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA DE TORRE EÓLICA.....	82
3.1 Objeto de aplicação do modelo.....	82
3.1.1 História da energia eólica e suas utilizações.....	84
3.1.2 Componentes de um aerogerador.....	86
3.1.2.1 Equipamentos.....	86
3.1.2.2 Fundação.....	89
3.1.2.3 Torre.....	91
3.2 Parâmetros para o desenvolvimento do projeto da torre.....	93
3.2.1 Geometria.....	93
3.2.1.1 Dimensionamento.....	93
3.2.1.2 Referências estéticas.....	95
3.2.1.3 Definição da estrutura e material.....	99
3.2.2 Forças e tensão resistente usadas na geração da forma.....	102
3.2.3 Técnicas e Ferramentas.....	107
3.2.3.1 Modelagem geométrica.....	107
3.2.3.2 Análise estrutural.....	108
3.2.3.2.1 Solução analítica x <i>Scan&Solve</i>	110
3.3 Desenvolvimento do projeto.....	116
3.3.1 Primeira etapa.....	116
3.3.1.1 Modelagem da casca.....	116
3.3.1.2 Análise estrutural da casca.....	120
3.3.2 Segunda etapa.....	125
3.3.2.1 Análise quantitativa: escolha dos perfis e quantidade de tubos.....	125
3.3.2.2 Desenvolvimento do algoritmo gerador da estrutura.....	129
3.3.2.3 Análise de possibilidades formais da estrutura.....	137
3.3.2.4 Critério de seleção.....	146
3.3.3 Resultado.....	147

4 CONCLUSÃO	150
--------------------------	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154
--	------------

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, que no caso do projeto de estruturas, acontece através de análise estrutural.

Na atualidade, mesmo com a introdução de ferramentas digitais computacionais, a perspectiva e o desenho projetivo ainda são o paradigma para a arquitetura e sua representação. Na prática profissional, a arquitetura incorporou o processo de projeto ao computador no final da década de 1980, com a introdução do sistema CAD que se consolidou nos anos 1990 como ferramenta indispensável no processo de projeto convencional.

No começo dos anos 2000, ocorreu uma mudança conceitual do uso do computador aplicado ao desenvolvimento do projeto arquitetônico. É possível afirmar que houve uma mudança de metodologia na arquitetura, com a evolução da forma representada digitalmente para a forma gerada digitalmente, onde o computador é utilizado de maneira a se explorar possibilidades.

É neste contexto de mudança de paradigmas que se abriram as possibilidades de simulação da forma através de processos de otimização ou de geração, onde os arquitetos começaram a desenvolver seus projetos baseados em desempenho. A arquitetura paramétrica

e algorítmica permite que os modelos sejam concebidos com base em relações paramétricas e através de *scripts*, e que sejam colocados dados matemáticos como base de geração da forma.

Sendo assim, esta dissertação coloca a seguintes questões como condutora deste trabalho de pesquisa: o trabalho de arquitetos e engenheiros estruturais pode convergir a partir de práticas digitais emergentes? Seriam as ferramentas digitais disponíveis suficientes para o desenvolvimento de um modelo baseado em desempenho ou esse tipo de metodologia ainda é inacessível fora da elite da arquitetura mundial? Como seria o desenvolvimento desse modelo com os recursos disponíveis no Brasil para um projeto de pequeno porte?

No Capítulo 2 foi feita uma revisão da história e das metodologias de projeto baseadas em princípios algorítmicos e paramétricos desde o princípio dos anos 2000. Para tanto também foi feita uma revisão teórica do que seriam os modelos baseados em desempenho aplicados ao projeto de arquitetura. Como recorte aplicado ao projeto estrutural, utilizou-se as bases do *Novo Estruturalismo* de Oxman e Oxman (2010) como fundamento conceitual para reverter-se o processo de desenvolvimento da estrutura.

Ainda no Capítulo 2, foram descritos alguns projetos e modelos desenvolvidos por arquitetos e engenheiros, que através de processos colaborativos de concepção da estrutura, produziram importantes obras da arquitetura contemporânea. O objetivo de se revisar os trabalhos desenvolvidos por escritórios de arquitetura como Foster + Partners e empresas de engenharia como Arup, não foi de utiliza-los como modelos a serem replicados, mas demonstrar as possibilidades de se desenvolver processos em que cada projeto é uma oportunidade de pesquisa e experimentação formal. A hipótese é que a reversão metodológica aplicada ao projeto de estruturas propicia resultados inovadores, pois o projeto não é apenas a reprodução de um padrão existente, mas uma solução gerada através de forças e parâmetros específicos do problema em questão.

Partindo dos questionamentos colocados, procurou-se primeiramente identificar quais seriam as ferramentas digitais disponíveis, e se, com o domínio destas ferramentas seria possível desenvolver algum tipo de aplicação experimental através desses recursos.

No Capítulo 3, foi proposto o desenvolvimento do projeto de uma torre de energia eólica com 140 metros de altura composta por perfis tubulares laminados de aço de seção circular (tubos circulares) fabricados pela Vallourec do Brasil (único fabricante nacional desse produto) como forma de validar a estrutura conceitual através da experimentação de modelo.

Optou-se pela utilização desse objeto por apresentar parâmetros bem definidos de geometria e forças aplicadas para a geração da forma. Além dos parâmetros quantitativos, parâmetros qualitativos foram utilizados para auxiliar na escolha da estrutura, dentre as inúmeras possibilidades geradas através da montagem do modelo paramétrico e algorítmico. Sendo assim o objeto apresentou a complexidade necessária para a aplicação do modelo baseado em desempenho.

Como metodologia proposta, a concepção da estrutura foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa foi desenvolvida uma casca, concebida com uma forma de aspectos arredondados por meio de modelagem paramétrica, apresentando a mínima superfície com os parâmetros geométricos estabelecidos. Essa casca foi submetida às combinações últimas de ações (as ações são majoradas por coeficientes de ponderação) e subdividida em 14 módulos de 10 metros cada ao longo de seu eixo vertical, sendo determinadas as tensões máximas de Von Mises solicitantes em cada módulo. Essas tensões foram comparadas com uma tensão máxima admitida. A tensão máxima admitida nesse critério levou em conta, de maneira aproximada, a possibilidade de ocorrência de instabilidade.

Depois de encontradas as tensões máximas, estas foram comparadas com uma tensão admissível, determinada levando-se em conta o coeficiente de ponderação da resistência do aço e, de maneira aproximada, a possibilidade de ocorrência de instabilidade. Para assegurar que a tensão solicitante de Von Mises não superasse a tensão admissível, a espessura de cada módulo da casca foi ajustada adequadamente. Essas espessuras foram a ligação entre o projeto estrutural da casca e a estrutura composta por barras a ser gerada na segunda etapa. Essa transição se deu através da conversão da espessura da casca em um somatório das espessuras equivalentes de tubos circulares em cada módulo. Através de tabelas dos perfis tubulares da Vallourec (2014), foi possível que a programação desenvolvida através de *script* convertesse os dados numéricos em modelos geométricos baseados na forma da casca concebida na primeira etapa.

Para tanto, foram utilizados os *plug-ins* de modelagem paramétrica *Grasshoper*, combinado com programação algorítmica em *Visual Basics*. Para análise estrutural foi escolhido o *plugin Scan&Solve*, que tem seu funcionamento baseado no Método dos Elementos Finitos, embora não tenha o mesmo princípio da geração de malhas. Esses *plug-ins* tem seu funcionamento na mesma base de dados que é o software *Rhinoceros*. Essas escolhas foram feitas considerando o critério de integração, permitindo uma operação praticamente

iterativa, estando a geração da estrutura intrinsecamente relacionada com os resultados da análise estrutural.

Dessa maneira, este trabalho procurou de maneira experimental desenvolver um modelo baseado em desempenho aplicado ao projeto estrutural através de uma reversão da maneira de se projetar a forma. Para isso, exploraram-se as ferramentas digitais emergentes, onde se pode combinar o desenvolvimento da geometria com a análise estrutural. Mas o que foi principalmente explorado foram os benefícios da reaproximação do trabalho do arquiteto e engenheiro de estruturas através da redefinição de posturas de ambos os profissionais. Trabalhando coletivamente com uma visão global e sistêmica da estrutura, o arquiteto consegue explorar qualitativamente e quantitativamente melhores soluções formais; e, o engenheiro, se incorpora no desenvolvimento do conceito da solução técnica no estágio inicial do projeto, e não somente tem sua participação na avaliação da forma pré-determinada. Desta maneira, a forma já é concebida de maneira otimizada, tendo o projeto ganhos estéticos, funcionais e econômicos.

2

PROCESSOS DIGITAIS DE PROJETO ARQUITETÔNICO E ESTRUTURAL BASEADOS NO DESEMPENHO

2.1 O uso das ferramentas digitais no projeto arquitetônico e estrutural

Na arquitetura, os processos de representação se iniciam com o desenvolvimento da técnica de perspectiva no século XV. O movimento científico renascentista propiciou condições para que os recursos de representação fossem valorizados e passassem a ser sistematizados e regularizados. Dessa forma, com uma representação mais precisa passou a haver a possibilidade de testar e analisar a obra anteriormente à construção. A representação do projeto adquiriu, portanto, importância, passando a incorporar preocupações técnicas e estéticas.

No século XVIII, foi desenvolvida a geometria descritiva e com isto foram estabelecidos os preceitos do sistema projetivo até hoje empregado na representação gráfica exata do espaço. O uso da perspectiva leva a uma maior precisão, estabelecendo um método matemático que transforma a realidade em modelos para que possa ser analisada.

Com a Revolução Industrial ocorreu uma mudança de relação entre processos, materiais e técnicas. Os novos processos mecanizados e especializados modificaram as relações de produção manufatureira. Para a arquitetura, essas novas relações acentuaram uma divisão e especialização maior entre o *fazer* e o *saber*. A diferença da figura desse arquiteto para o Renascentista, é que o projeto não estava mais centrado no arquiteto como criador, artista e cientista.

A Arquitetura Moderna nasce das modificações técnicas, sociais e culturais relacionadas com a Revolução Industrial. As mudanças tecnológicas levam a uma nova infraestrutura de sociedade e à exploração de uma maior capacidade produtiva. Assim, começaram a surgir delimitações e especializações profissionais e o cálculo estrutural se afastou da forma arquitetônica, sendo incorporado em fase posterior à concepção do projeto. Também ocorreu o surgimento de funções relacionadas ao controle, planejamento e orçamento, inexistentes em épocas anteriores. Com seus princípios de racionalização, levou ao limite a utilização da representação arquitetônica, racionalizando os espaços, resolvendo em projeto as possibilidades de otimização da arquitetura, muitas vezes negligenciando conhecimentos construtivos. O Modernismo deu continuidade ao processo de separação entre projeto e construção que já se encontrava incorporado na prática arquitetônica e reforçou o modo de produção da arquitetura via representação.

A precisão do desenho técnico fez com que este fosse o método condutor do processo de projeto desenvolvido desde o século XVIII até a contemporaneidade. Outros domínios adotaram as mesmas características dessa linguagem gráfica, tais como o cálculo estrutural, os projetos de instalações e a engenharia mecânica.

Nas últimas décadas as ferramentas digitais têm se tornado uma ferramenta para exploração de possibilidades para o desenvolvimento de projetos de arquitetura. Os primeiros casos do uso do computador na arquitetura e engenharia foram registrados na década de 1960, onde a vantagem de cálculo oferecida pela nova ferramenta criava possibilidades de investigações formais atreladas ao cálculo estrutural.

Uma das primeiras obras a utilizar o computador para o processo de projeto de arquitetura foi o da Capela da Academia de Cadetes da Força Aérea dos Estados Unidos (Fig. 2.1) nos anos 60 pelos engenheiros do escritório de cálculo estrutural SOM. O processo de se encontrar a forma foi atrelado ao cálculo, onde o sistema *Field Theory*¹ foi utilizado para auxiliar no projeto estrutural. O escritório fez investimentos em máquinas, que tinham o custo elevado à época, e daí deve-se provavelmente a primeira experiência de programação algorítmica aplicada ao desenvolvimento de uma obra de construção civil (SOM, 2014).

¹ Sistema computacional desenvolvido pelo arquiteto Walter Netsch na década de 60 para o desenvolvimento de formas complexas através da rotação de quadrados (SOM, 2014).

Figura 2.1 - Capela da Academia de Cadetes da Força Aérea dos Estados Unidos



Fonte: NATIVIDADE, 2010

Paralelamente, o Método dos Elementos Finitos² também se tornou cada vez mais difundido na década de 1960, com o desenvolvimento e a disponibilidade de *softwares* utilizando o método. Como um marco importante, em 1965, a NASA desenvolveu o NASTRAN, que ampliava as possibilidades de uso para análise de tensões em duas e três dimensões, em barras, e elementos contínuos, permitindo a análise de estruturas complexas como armaduras de avião (FISH, 2009).

Na arquitetura, a primeira geração de sistemas CAD (*Computer Aided Design*) tinha uma abordagem diretamente ligada à ciência da computação, onde as estruturas de dados armazenadas no computador geravam potenciais soluções de projeto, de forma automática (ANDRADE, 2012).

Mas, após essas experiências iniciais, o uso dos computadores na arquitetura passou a ser questionado devido aos altos custos das máquinas e à baixa eficiência para a concepção e desenvolvimento de projetos. As experiências satisfatórias foram as em que o computador era usado como ferramenta de representação, afastando cada vez mais a concepção e desenvolvimento de projetos das aplicações envolvendo o cálculo de estruturas.

A partir década de 1970, as ferramentas digitais passaram a integrar todas as etapas do processo de projeto arquitetônico. Mas, as experiências mais satisfatórias tinham sido as em que sua aplicação foi limitada como ferramenta de representação. Algumas promessas do uso do computador como ferramenta de auxílio na tomada de decisões foram frustradas devido às

² Segundo Assan (2003), o Método dos Elementos Finitos (MEF) é o mais utilizado para análises linear e não-linear em programas computacionais, tendo surgido para resolver problemas da teoria da elasticidade. O MEF é baseado no método de Rayleigh-Ritz e prevê a divisão do domínio de integração, em uma malha discretizada em um número finito de pequenas regiões denominadas *elementos finitos*. Através de um sistema de equações, se podem obter para os nós de cada elemento os deslocamentos e as forças internas.

restrições dos sistemas operacionais à época. Além do mais, os custos envolvidos na adoção das ferramentas digitais eram altos para projetos de arquitetura, tendo feito com que os arquitetos não abandonassem suas ferramentas tradicionais de representação e metodologia de projeto.

Somente com a popularização dos computadores na década de 1980 é que foram retomadas as discussões sobre o uso de ferramentas digitais na arquitetura e, conseqüentemente, sobre metodologia de projeto como ciência. Mas, nesse período, o desenvolvimento das ferramentas digitais aplicadas à arquitetura foi no sentido somente de melhorar a representação de modelos 3D, gerando cada vez maior precisão nas imagens foto-realísticas.

Na década de 1990, com a popularização dos computadores, os escritórios de arquitetura adotaram o seu uso de forma massiva. O lançamento do *AutoCad 12* em 1992 consolidou a difusão do software e da maneira representativa de se projetar em meio digital. Nessa segunda geração CAD³, os sistemas eram principalmente voltados para a representação 2D e 3D do projeto. Alguns arquitetos como Greg Lynn e Peter Eisenman iniciaram pesquisas de como utilizar ferramentas digitais para propiciar novas maneiras de se criar a forma arquitetônica. Alguns críticos rebatem esse tipo de uso dessas ferramentas. Segundo Novak (2000), por exemplo, a ênfase não deveria ser dada na modelagem ou renderização de objetos, mas às relações entre as partes.

Na engenharia, os programas de análise de tensões pelo MEF se tornaram cada vez mais populares, permitindo a simulação e o cálculo de estruturas cada vez mais complexas. Nesse período, arquitetura, engenharia e construção distanciaram-se, passando cada um a desenvolver seus próprios *softwares*. A arquitetura desenvolveu-se cada vez mais em processos de representação, e a engenharia, em processos computacionais de cálculo e otimização.

Após os anos 2000, alguns arquitetos retornaram às investigações de se explorar o meio digital incorporado ao processo criativo. Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, passou a ser viável a experimentação de formas complexas, antes impossível de se representar através da perspectiva. As ferramentas digitais foram evoluindo de tal forma, que permitiram novas aproximações com o cálculo estrutural.

³ Os programas CAD reproduzem em sua lógica estrutural o processo de representação Renascentista, “ainda que o façam de forma muito mais rápida e permitam a manipulação em tempo real, não há nenhuma mudança na lógica de representação” (BALTAZAR, 2012).

O ponto de inflexão na história do processo de projeto em arquitetura com relação ao uso de ferramentas digitais ocorreu com a construção do Museu Guggenheim em Bilbao, do arquiteto Frank Gehry, inaugurado em 1997 (Fig. 2.2). A razão de se considerar o projeto e a construção do museu como ponto de inflexão, é que este teve sua forma totalmente desenvolvida em meios digitais, o que só foi possível devido ao uso de tais ferramentas. Até a construção do museu, ainda não estava efetivamente consolidada a possibilidade de construção das formas não euclidianas propostas por várias investigações conceituais. O projeto do museu utilizou-se de softwares sofisticados, até então empregados somente na indústria aeroespacial.

Figura 2.2 - Museu Guggenheim de Bilbao



Fonte: fotografia tirada pela autora

A construção do museu de Frank Gehry coincide com criação de novas geometrias curvas propiciadas pelo desenvolvimento das formas amébricas da chamada Arquitetura Blob⁴. O Water Pavillion, construído em 1997 (Fig. 2.3) e desenvolvido pelo escritório de arquitetura NOX foi a primeira obra construída a utilizar o conceito de geometria contínua, onde em uma linguagem até então completamente nova, não era possível diferenciar piso, paredes e teto.

⁴ A exploração dos espaços topológicos com meta-esferas levou ao desenvolvimento de certa imagem na arquitetura que se tornou muito popular entre os arquitetos digitais a partir da década de 1990, tendo ficado conhecida como Arquitetura Blob (*Binary Large Object*).

Figura 2.3 – Water Pavillion



Fonte: NOX, 2014

No final da década de 2000, passou-se o entusiasmo pelas BLOBS⁵ e voltou-se um questionamento sobre a validade das arquiteturas digitais e toda a sua complexidade (NAVIDADE, 2010). O interesse na metodologia de projeto surge devido a um caráter de complexidade dado ao processo. Sendo assim, o desenvolvimento de um método mais científico e sistemático torna-se coerente para o ato projetual. As ferramentas computacionais permitem uma maior racionalização do processo, permitindo a eficácia no desenvolvimento de aspectos mais complexos do projeto. Neste contexto, a arquitetura passa a funcionar como um sistema de informações, e se aproxima dos conceitos da cibernética⁶.

É possível afirmar que ocorreu uma mudança de metodologia na arquitetura, onde houve uma evolução da forma representada digitalmente para a forma gerada digitalmente. O conceito de *Computer-Aided Design* (CAD) é substituído pelo conceito de *Computer-Aided Architectural Design* (CAAD), sendo o primeiro o desenho assistido pelo computador e o segundo, a utilização do computador de maneira exploratória. Nessa nova maneira de se projetar, o arquiteto deixa de modelar formas para articular uma lógica interna de geração da forma. Sendo assim, uma variedade de possibilidades formais pode ser produzida de maneira automática, onde o arquiteto pode escolher a mais apropriada para ser desenvolvida (KOLAREVIC, 2003).

Nessa nova abordagem, os processos de projeto mudaram significativamente, principalmente o papel que o arquiteto passa a desenvolver nas etapas de análise, síntese e avaliação da forma, e como se dá a comunicação entre os profissionais envolvidos (ANDRADE, 2012). As possibilidades de simulação do desempenho do edifício vêm

⁵ BLOB – Binary Large Object

⁶ "Cybernetics was famously defined in more recent times by Norbert Wiener in 1948, as the science of "control and communication, in the animal and the machine." (LEMOS, 2009)

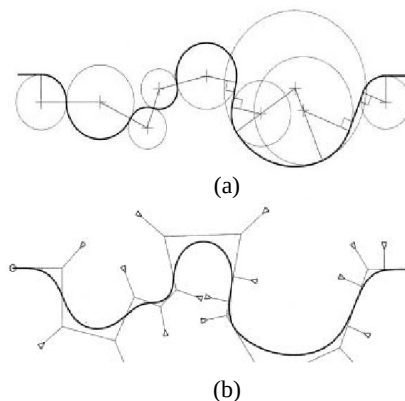
estimulando profissionais a desenvolverem invenção e inovação. Segundo Umakoshi (2014) tecnologias digitais vêm possibilitando uma reaproximação entre os profissionais de arquitetura, engenharia e construção, permitindo que os dados e desenhos de projeto sejam compartilhados de maneira dinâmica e sem a perda de informações no processo.

2.1.1 Design computacional avançado

Nos anos 1980, o uso do computador na arquitetura foi popularizado com o desenvolvimento de ferramentas CAD (*Computer-Aided Design*), transformando as formas de projeto e sua capacidade produtiva. O desenvolvimento de algumas ferramentas de representação para o desenho de objetos de geometria não-euclidiana só foi possível através do desenvolvimento das linhas NURBS (*Non Uniform Rational Basis Spline*) na década de 1950, sendo esta uma representação matemática de superfícies livres. Na década de 1960 o conceito foi traduzido para linguagem computacional, mas só na década de 1990 é que os computadores conseguiram transferir essa tecnologia para uma linguagem gráfica e interativa.

As linhas NURBS permitem que o desenho de uma linha seja feito por uma composição de arcos, e cada um deles pode ser alterado individualmente sem a necessidade de se alterar os demais (Fig. 2.4). O desenvolvimento dessas linhas em *softwares* computacionais ampliou o repertório de formas dos arquitetos, por se aproximar de um traço mais fluido, como no desenho à mão. Ele permitiu o desenvolvimento de formas cada vez mais complexas e esteticamente leves, tornando a criação digital de formas topológicas computacionalmente possíveis.

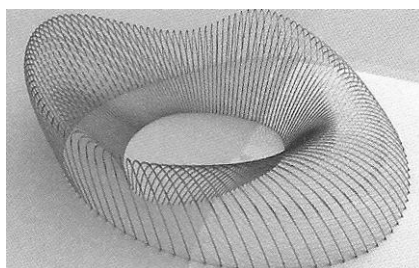
Figura 2.4 - Composição de arcos de forma convencional (a) e com NURBS (b)



Fonte: NATIVIDADE, 2010

As curvas e superfícies produzidas pelas linhas NURBS proporcionam ao usuário um alto grau de controle da forma através de pontos, onde a alteração de um ponto afeta todos os outros componentes do sistema. Na Fig. 2.5 pode-se ver a concepção do projeto do pavilhão de verão para o German Architecture Museum em Frankfurt, desenvolvido com uma série de linhas NURBS, que juntas compõem a forma.

Figura 2.5 - Concepção do projeto do pavilhão de verão para o German Architecture Museum



Fonte: DUNN, 2012

Uma outra alternativa para se gerar superfícies curvas computacionalmente é através de *meshes*, ou em sua tradução, malhas. A malha formada por polígonos aproxima a superfície curva por meio de vértices, bordas e faces, que combinados definem a forma do objeto, permitindo a representação de superfícies topológicas. As malhas poligonais são muito utilizadas em computação gráfica em modelos tridimensionais e também para análise estrutural através do Método dos Elementos Finitos.

A fabricação dessas formas só se tornou possível com a tecnologia de fabricação CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Mais do que a produção de formas inovadoras, a complexidade geométrica de projeto e fabricação fez com que os arquitetos voltassem a se engajar no processo de produção. Isso abriu inúmeras possibilidades para exploração dos limites tectônicos e estéticos da forma (DUNN, 2012). A fabricação digital não será explorada neste trabalho, mas sua integração com os *softwares* de desenvolvimento paramétricos e algorítmicos são fundamentais para a produção da maioria dos projetos que são mostrados ao longo deste capítulo.

A escolha dos *softwares* de geração da forma, otimização, análise e produção também dever ser cuidadosamente estudadas no início do processo de projeto. É imprescindível que

haja interoperabilidade⁷ entre as ferramentas utilizadas para que não ocorra interferência, distorção ou perda de informação da forma na comunicação entre os *softwares*.

2.2 Arquitetura paramétrica e algorítmica

Alguns *softwares* CAD são capazes de criar tanto desenhos bidimensionais quanto modelos tridimensionais, com representações renderizadas de maneira realística e com a possibilidade de gerar animações. As vantagens do CAD são que os elementos podem ser facilmente manipulados no desenho, permitindo rápidas transformações no projeto. A desvantagem com relação às novas ferramentas paramétrica e algorítmica (CAAD), é que qualquer alteração de projeto deve ser feita manualmente pelo usuário, o que demanda tempo de projeto.

Os processos de projeto paramétricos e algorítmicos são os que mais têm apresentado modificações na maneira de se projetar. O processo paramétrico é baseado na relação entre objetos, onde as modificações de parâmetros podem se propagar por todo o sistema (MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008). O processo algorítmico, segundo Leach apud Umakoshi (2014, pg. 141) é um processo definido através de *script*, utilizando processos matemáticos para a resolução de problemas de projeto. Sendo assim, o processo paramétrico está diretamente ligado à manipulação de formas e o algorítmico à utilização de um código, sendo o paramétrico interativo e o algorítmico iterativo (UMAKOSHI, 2014). Portanto, a técnica algorítmica é baseada no uso do código; e, a paramétrica, na manipulação da forma. Embora sejam duas técnicas distintas, o algoritmo é sempre utilizado em associação com técnicas paramétricas.

As novas possibilidades de projeto e formas só foram possíveis através do desenvolvimento de geometrias e métodos que permitiram ao arquiteto desenvolver estratégias projetuais, tendo tido um impacto maior do que simplesmente em investigações formais e estilísticas. A redefinição na maneira como a arquitetura é concebida e produzida criou uma relação mais íntima entre tecnologia e produção, principalmente com o desenvolvimento dos processos de fabricação digital.

⁷ Interoperabilidade é a capacidade de um sistema (informatizado ou não) de se comunicar de forma transparente (ou o mais próximo disso) com outro sistema (semelhante ou não).

No novo contexto de produção, tornou-se crescente a importância do design paramétrico e algorítmico. A arquitetura desenvolvida através de parâmetros e algoritmos permitiu o desenvolvimento de métodos iterativos que possibilitam a criação de formas complexas.

2.2.1 Arquitetura paramétrica

Paramétrico é um termo utilizado em várias disciplinas, da matemática ao design. Literalmente significa trabalhar com parâmetros em uma variação. No campo do design contemporâneo, sua utilização se refere ao uso de *softwares* de modelagem paramétrica (LEACH, 2014). Esses *softwares* são muito utilizados por arquitetos que trabalham um desenho curvilíneo caracterizado pela manipulação da forma, como nas obras de Zaha Hadid (Fig. 2.6). O termo “Parametricismo” foi criado para denominar esse novo “estilo” de arquitetura. Para Patrik Schumacher, sócio em Zaha Hadid Architects, o Parametricismo sucedeu o Modernismo como um novo estilo global de arquitetura (LEACH, 2014).

Figura 2.6 – Projeto de Zaha Hadid para Nordpark Cable Railway



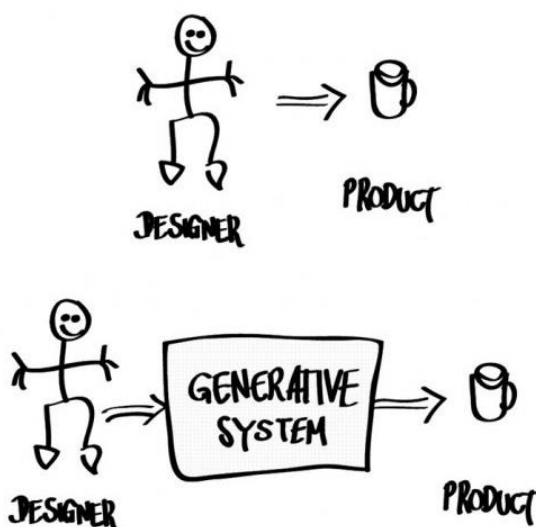
Fonte: DUNN, 2012

Mas, o design paramétrico não pode ser reduzido somente a uma atribuição estética. Na concepção paramétrica o arquiteto define relações entre elementos ou grupos de

elementos, atribuindo valores ou expressões para organizar o controle desses parâmetros. Sendo interativo, o software permite que as alterações de parâmetros ocasionem instantaneamente alterações na forma. Com esse controle, as informações do projeto ficam mais precisas para processos de fabricação digital (LEACH, 2014).

O design paramétrico permite que os valores e equações sejam alterados, de tal maneira que as relações entre os elementos sejam afetadas, sendo incorporadas pelo sistema produzindo mudanças visuais na forma. Segundo Spuybroek (2008), o desenho generativo é a coexistência do esquema e da forma, que são transformados em diagrama e código através das ferramentas digitais. A relação entre organização e estrutura é uma relação que existe em qualquer objeto. Uma estrutura tipológica não é capaz de variar, mas, ao contrário, quando a organização é feita através do desenho generativo, ela se torna uma máquina capaz de produzir uma multiplicidade de soluções. Para tornar-se máquina, a organização precisa ser um sistema e, este precisa estar baseado em regras. Na Fig. 2.7 o diagrama de Fisher e Herr apud Celani (2011) demonstra de maneira simples a diferença de um produto produzido com estrutura tipológica, e do produzido com um sistema generativo.

Figura 2.7 – Diagrama de Fisher e Herr



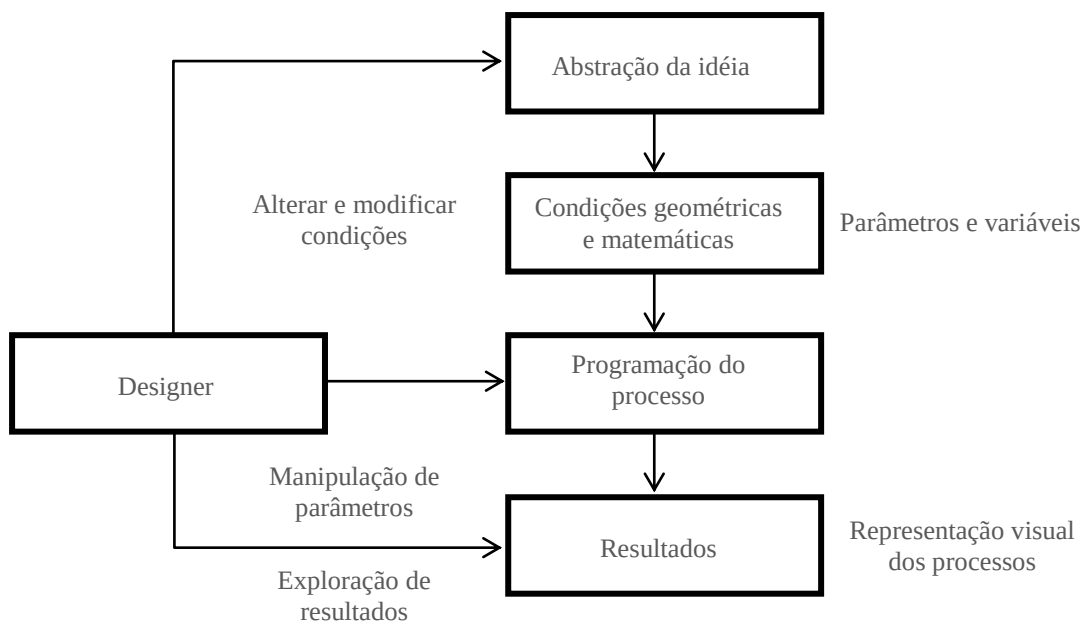
Fonte: FISHER E HERR apud CELANI, 2011

A maior vantagem do design paramétrico, é que uma vez estabelecida as relações, o sistema pode ser automaticamente alterado apenas com a variação numérica dos parâmetros,

onde várias soluções podem ser testadas. Segundo Celani (2011), um sistema generativo pode ser utilizado visando à otimização (convergência) ou à variedade (divergência), por meio da geração de múltiplas alternativas.

Com relação a um modelo tridimensional convencional, o design paramétrico possibilita uma multiplicidade de opções a serem geradas com uma única montagem de sistema, evitando que a cada nova alteração o modelo tenha que ser refeito, conforme demonstrado no diagrama 2.1.

Diagrama 2.1 – Desenho paramétrico



Fonte: adaptado de MOLINARE, 2011

2.2.2 Arquitetura algorítmica

Terzidis (2006) explica que um algoritmo é um processo computacional para resolver um problema com um número finito de passos. “Envolve dedução, indução, abstração, generalização e lógica estruturada. Estratégias algorítmicas utilizam a busca por padrões repetitivos, princípios universais, módulos intercambiáveis e conexões indutivas” (TERZIDIS, 2006).

Os algoritmos foram criados inicialmente para resolver problemas matemáticos. Em arquitetura, eles têm sido utilizados para explorar possíveis soluções desconhecidas, gerando a forma, avaliando-a e escolhendo a solução mais adequada com rapidez e precisão. Sendo iterativos, trabalham por repetição do processo de resolução de uma equação ou de um problema mediante uma sequência finita de operações em que o resultado é o objeto (UMAKOSHI, 2014).

O design paramétrico necessita de um sistema CAD tridimensional para seu funcionamento. Os algoritmos podem ser implementados através de *scripts* em softwares paramétricos ou como um código independente. No método representativo tradicional de projeto, o computador funciona como uma interface visual. No projeto através de programação, as formas são desenvolvidas por meio de um raciocínio projetual, explorando a capacidade computacional de estender o raciocínio humano.

O algoritmo passa a funcionar como um mediador entre o computador e o arquiteto, controlando as opções de projeto dentro das regras criadas. Para a construção do algoritmo, primeiramente deve ser estruturada uma lógica de projeto. Depois de desenvolvida a estrutura do pensamento, o código é criado, e deve ser revisado, evitando erros de sintaxe e construção que podem gerar resultados indesejados. Uma vez funcionando o código, este possibilita um processo de repetição.

Segundo Reas, Mcwillians e Lust (2010) um algoritmo pode ser definido como tendo quatro qualidades:

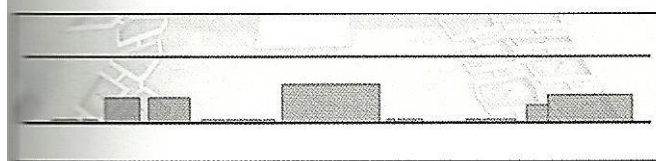
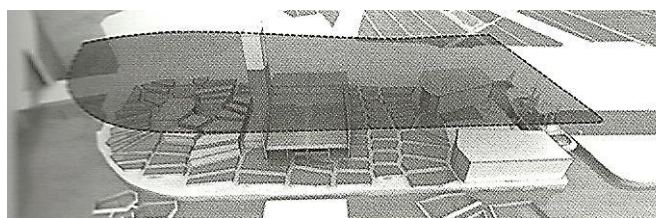
- existem várias maneiras de se escrever o código de um algoritmo;
- um algoritmo requer suposições; é necessário saber qual caminho se quer percorrer para chegar a um determinado resultado;
- um algoritmo inclui decisões, devendo o desenvolvedor assumir as direções e as possibilidades que devem ser consideradas;
- um algoritmo complexo pode ser partido em módulos para facilitar sua compreensão.

O processo iterativo possibilitado pelo algoritmo pode ser denominado de processo generativo, no qual, segundo Oxamn (2006), a forma é encontrada a partir de regras que as geram. Celani apud Umakoshi (2014, pg. 142) afirma que um sistema generativo é um processo indireto, onde o objetivo não é a forma em si, mas um conjunto de soluções geradas sistematicamente com a aplicação de um método. Portanto, o controle do arquiteto sobre a

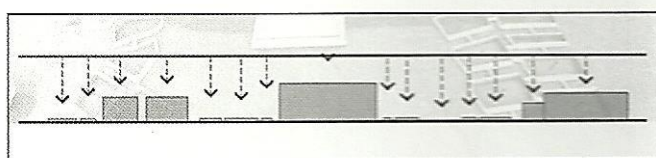
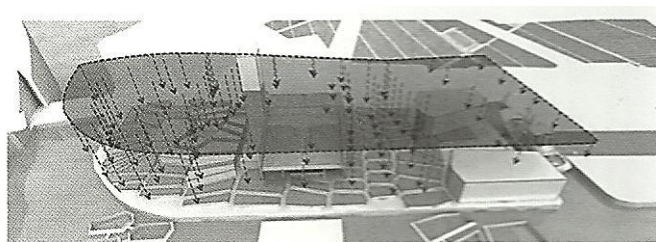
forma final é muito menor no processo generativo do que no processo paramétrico, podendo apresentar uma solução formal inesperada e surpreendente.

Como exemplo de projeto generativo, na Fig. 2.8 o projeto do arquiteto Romulus Sim (DUNN, 2012) usa essa metodologia para desenvolver a cobertura que interliga algumas edificações na área do porto de Birkenhead na Inglaterra. O projeto foi programado através de um algoritmo que inter-relaciona os edifícios de maneira otimizada. O objetivo da forma encontrada é abrigar as edificações, possibilitando o máximo de penetração da luz solar com a mínima carga de vento possível.

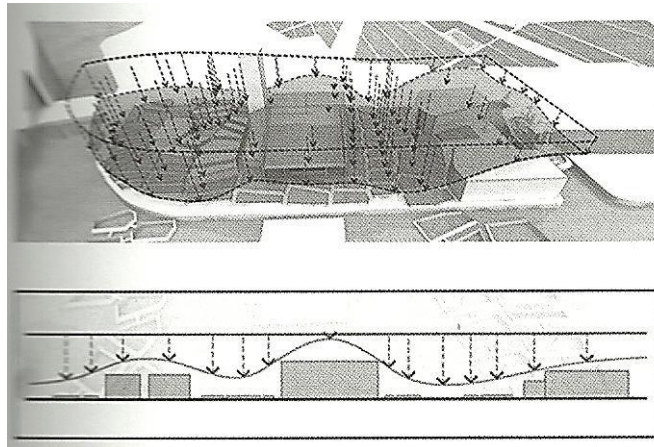
Figura 2.8 – Processo algorítmico de projeto para cobertura na área do porto de Birkenhead



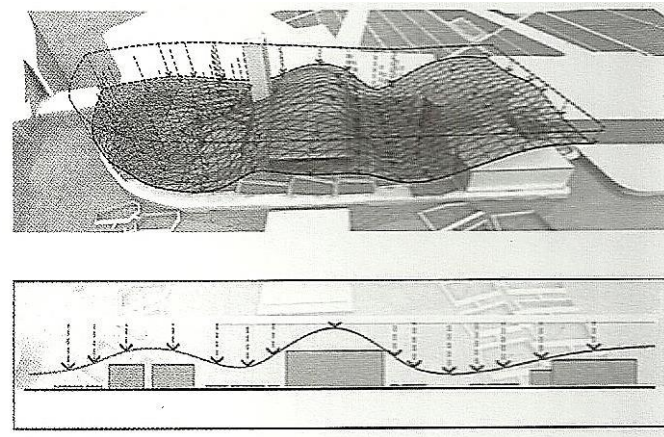
(a) Implementação da área e altura máxima da cobertura



(b) Uma nuvem de dados é gerada com uma série de pontos, que são plotados com relação à largura e altura; vãos maiores correlacionam uma profundidade maior na estrutura do telhado



(c) Conectando os pontos uma superfície é gerada



(d) A partir da superfície é desenvolvida uma estrutura treliçada gerada por um *script* que controla o tamanho de cada elemento determinando o tamanho máximo de 3m em qualquer direção

Fonte: DUNN, 2012

A arquitetura algorítmica e sua combinação com a análise estrutural cria princípios emergentes de espaço, estrutura e construção, que impactam na pesquisa e na prática da arquitetura e engenharia. Os arquitetos tem que desenvolver novas competências, tais como um grande entendimento de matemática e o aprendizado de programação. Tradicionalmente, o paradigma dominante para a discussão e produção de arquitetura tem sido o de intuição humana e engenhosidade. Pela primeira vez, talvez, uma mudança de paradigma está sendo formulada, criando formas além da compreensão, situadas dentro de um domínio matemático algoritmo (TERZIDIS, 2003).

O processo de criação deixa de ser meramente intuitivo e força os arquitetos a terem um alto nível de abstração do problema, de tal forma a conseguirem descrever suas concepções formais através de algoritmos, de maneira precisa e elegante. O processo colaborativo entre arquitetos e engenheiros cria uma nova estética estrutural, baseada em princípios de otimização e precisão, podendo resultar em formas geradas a partir de parâmetros baseados em desempenho.

2.3 Projeto baseado em desempenho

Segundo Kolarevic (2005) o termo performance em arquitetura possui uma multiplicidade de significados. Para ele, a arquitetura performativa é onde uma complexa rede de conexões culturais, tecnológicas e espaciais se forma, se afetando simultaneamente e continuamente, onde o espaço se desdobra de maneiras indeterminadas. Dentro de um recorte tecnológico, a performance tem como significado o desempenho. Sendo assim, não será utilizado neste trabalho o termo projeto performativo para evitar sua abrangência.

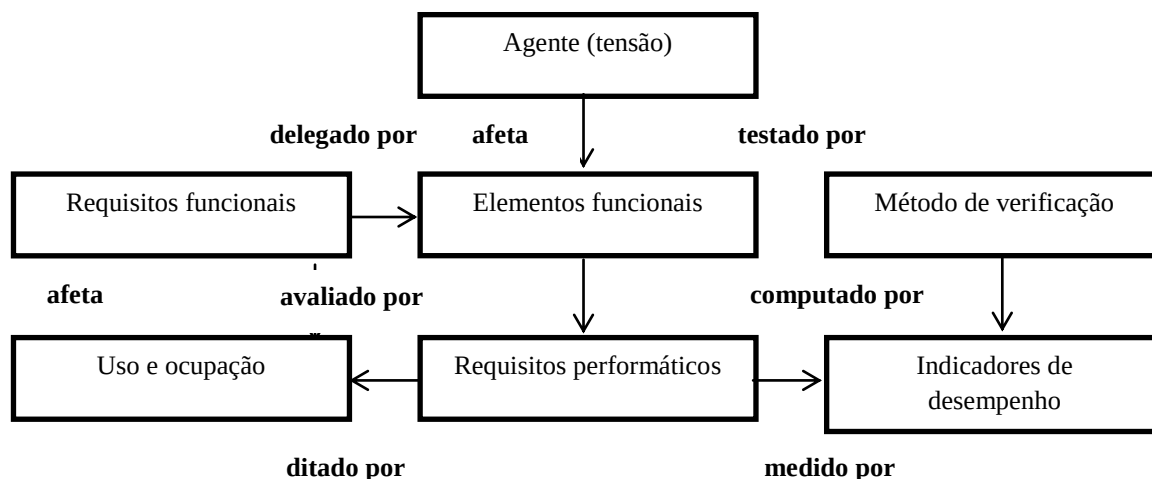
No desenvolvimento de um projeto arquitetônico baseado em desempenho, a prioridade do edifício é responder a alguns parâmetros prioritários e a forma é uma consequência dessas respostas. As ferramentas digitais auxiliam o arquiteto a encontrar soluções ótimas de projeto, analisando e avaliando aspectos quantitativos e qualitativos ainda na etapa de estudo preliminar.

Para Augenbroe (2005), existem alguns conceitos que devem ser estabelecidos para os modelos baseados em desempenho:

- meta para o alcance do desempenho;
- necessidades funcionais;
- necessidades performáticas;
- indicadores de desempenho;
- definição dos métodos de verificação;
- definição de elementos componíveis, tais como escolha de produtos em um catálogo;
- habilidade proporcionada pelo sistema aos agentes participantes do processo de alteração dos parâmetros determinados.

Esses conceitos podem ser relacionados de acordo com o diagrama 2.2:

Diagrama 2.2 – Relação entre conceitos da abordagem de desempenho



Fonte: Adaptado de AUGENBROE, 2005

Segundo Andrade (2012), do ponto de vista do projeto digital, o projeto baseado em desempenho pode implicar na reformulação das estruturas internas, com a integração de mecanismos de simulação e geração. Dessa maneira, é fundamental que o processo de modelagem e simulação seja colaborativo, com a participação dos engenheiros ainda dos estágios preliminares de concepção da forma, fazendo com que esses profissionais redefinam suas posturas (KOLAREVIC, 2005).

O conceito de desempenho na arquitetura significou o avanço em duas áreas: na simulação ambiental e estrutural. Para o projeto estrutural, Oxman apud Andrade (2012, pg. 61) propõe a divisão de duas subclasses para o modelo baseado em desempenho: o modelo baseado em otimização e o modelo baseado em geração.

2.3.1 Modelo baseado em otimização

O modelo baseado em otimização busca através de técnicas computacionais de simulação, modificar a forma por meio da otimização de determinados critérios de

desempenho do edifício. Nesse modelo, segundo Andrade (2012), o arquiteto ainda assume o papel de idealizador da forma, submetendo-a posteriormente a um processo de otimização com a colaboração de diferentes projetistas, a fim de atender a alguma condição de desempenho pré-estabelecida. O projetista otimiza uma solução concebida manualmente. A otimização segundo Kolarevic (2005), é utilizada no pós-design para ter certeza de que o sistema estrutural concebido é viável, procurando a máxima eficiência da forma com o mínimo de material.

Um exemplo dessa metodologia foi a concepção do Melbourne Stadium na Austrália (Fig. 2.9), que foi guiado pela combinação de parâmetros de sustentabilidade e considerações funcionais e estruturais. Em uma parceria entre a empresa de engenharia Arup e o escritório de arquitetura Cox Architects, a estrutura da cobertura em cúpula geodésica, foi concebida com base em uma rede de grandes círculos que se cruzam para formar os elementos triangulares estáveis de uma malha estrutural (BURRY; BURRY, 2010).

Figura 2.9 – Melbourne Stadium

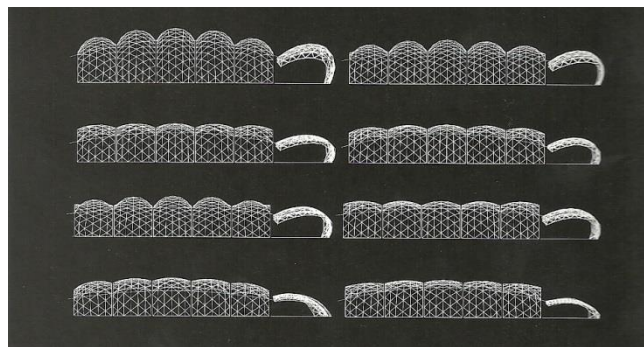


Fonte: ARUP, 2014

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 interativa (Fig. 2.10). 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.

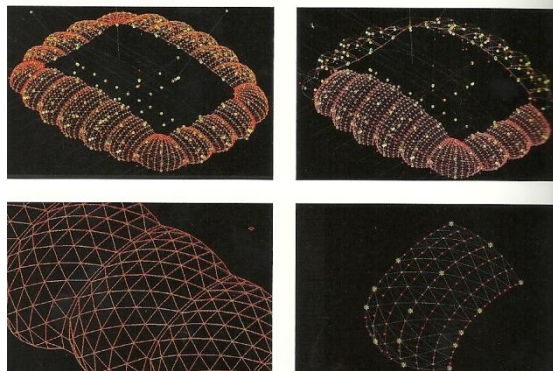
Figura 2.10 - Variantes paramétricas na secção da cúpula e a curva sobre o qual se situam as cúpulas



Fonte: BURRY; BURRY, 2010

A transferência de informação a partir dos modelos geométricos para a análise estrutural e processo de otimização, foi automatizada 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. 2.11).

Figura 2.11- Alterações na curva de varredura da cobertura conforme desenvolvimento do projeto.



Fonte: BURRY; BURRY, 2010

Segundo Malkawi (2005), os engenheiros se especializaram em solucionar problemas complexos com o desenvolvimento de métodos numéricos de otimização. Os algoritmos desenvolvidos são utilizados em processos de avaliação, após a geração da forma, o que torna o potencial de design estrutural baseado em desempenho pouco explorado. A sequência de projeto continua sendo a mesma, onde o arquiteto concebe a forma e posteriormente o engenheiro a otimiza. Muitos arquitetos contemporâneos utilizam ferramentas de avaliação e otimização após a concepção do projeto, mas estes processos tendem a ser limitados e implicam em retrabalho da equipe de design (GROBMAN, 2012).

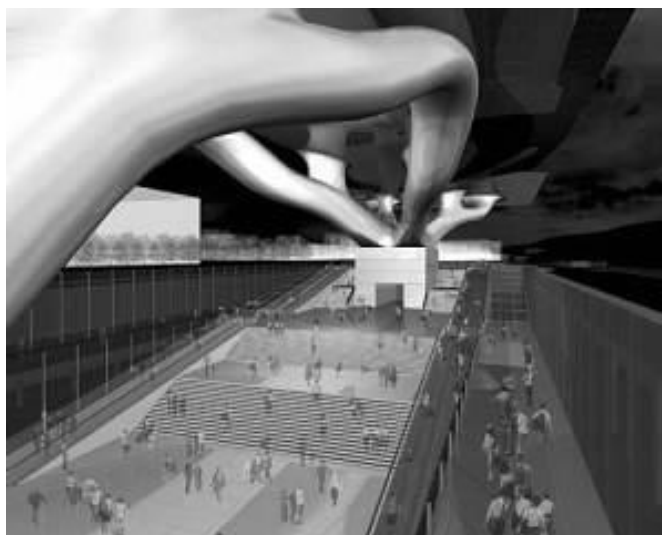
2.3.2 Modelo baseado em geração

O modelo baseado em geração da forma fundamenta-se na capacidade de encontrar a forma, incorporando questões estruturais e materiais à geometria, ainda nos estágios iniciais de concepção. Há uma reversão do paradigma design-análise para a geração baseada no desempenho (Malkawi, 2005). Segundo Oxman (2008), esse tipo de modelo deve atender às seguintes características:

- modelo geométrico paramétrico;
- processo avaliativo integrado ao modelo geométrico e aos mecanismos de otimização;
- interatividade do projetista como moderador do processo através de algoritmos geradores da forma.

Nesse processo os critérios de desempenho guiam a geração da forma, e não apenas otimizam uma solução convergente/divergente. Existe uma ligação explícita entre o desempenho, a geração e a representação. Qualquer alteração nos critérios é representada diretamente na geração da forma. O trabalho desenvolvido pelo escritório SOM com algoritmos genéticos (GA) e pelo engenheiro Mutsuro Sasaki para a competição da Florence New Station em 2003 (Fig. 2.12) é um exemplo de projeto concebido com essa metodologia, que será melhor descrita no item 2.5.

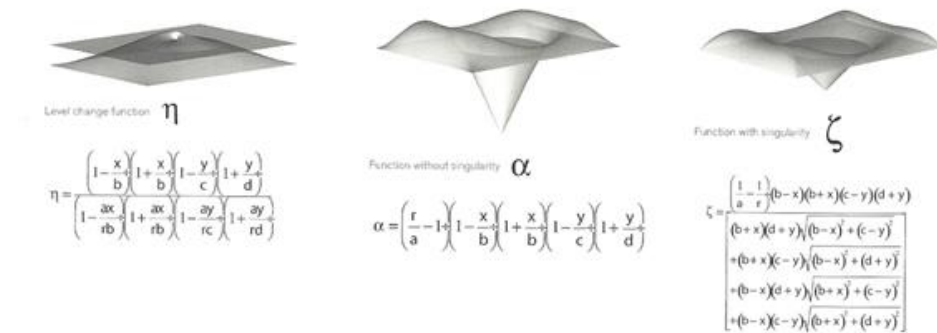
Figura 2.12– Projeto generativo para a competição da Florence New Station (2003)



Fonte: MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008

Um exemplo de aplicação desse processo é o desenvolvimento da cobertura de vidro do British Museum em Londres concebido pelo escritório de arquitetura Foster + Partners em parceria com o escritório de engenharia Buro Happold. Sua definição geométrica consistiu de duas partes: a primeira, a definição da forma da superfície, e a segunda, o desenvolvimento do padrão da estrutura metálica sobre a superfície. Para a concepção da forma, foi necessária a criação de uma fórmula matemática (Fig. 2.13) que garantisse a singularidade da curvatura da superfície nos cantos, já que a cobertura seria executada em um edifício histórico existente. A razão para essa singularidade é que o limite retangular deveria evitar deslizamento de tal maneira a evitar forças horizontais no edifício existente.

Figura 2.13 – Fórmula matemática desenvolvida para concepção da superfície



Fonte: BURRY; BURRY, 2010

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 descontinuidades na curvatura geodésica, movendo cada nó para um ponto na superfície igual à média ponderada dos seus vizinhos (BURRY; BURRY, 2010).

Figura 2.14 - Simulações computacionais de subdivisão da cobertura



Fonte: BURRY; 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. 2.14). 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 de eficiência estrutural, econômicos e de conforto termo-acústico.

O projeto baseado em desempenho quando trabalhado em processos digitais aparece como um instrumento que contribui para a concepção de projetos inovadores, com a integração de mecanismos de simulação e geração, exigindo dos profissionais posturas colaborativas no processo de projeto. Kolarevic (2005) afirma que questões qualitativas e quantitativas de desempenho devem ser colocadas como princípios tecnológicos que guiarão novas abordagens de projeto.

As possibilidades de implementação de processos generativos têm crescido significativamente. No princípio dos anos 2000, apenas escritórios de elite, com estrutura para ter equipes de programadores como Foster + Partners tinham recursos para o desenvolvimento desses processos. Atualmente os *softwares* paramétricos como o *Grasshoper* têm tornado essa metodologia cada vez mais conhecida. O projeto baseado em desempenho reflete as mudanças na própria profissão de arquiteto e a mudança de filosofia, onde os profissionais parceiros, principalmente o engenheiro estrutural têm fundamental importância na concepção da forma. Isso torna necessária uma mudança pedagógica na formação do arquiteto, exigindo do profissional uma maneira cada vez mais complexa de pensar, com o envolvimento de várias disciplinas já no estágio de concepção.

2.4 O novo estruturalismo

2.4.1 Arquitetura e Engenharia Estrutural

Segundo Grobman (2012), um novo tipo de arquitetura baseada em dados e desempenho está gradualmente sendo desenvolvida em contraste com as arquiteturas focadas em tipologia. A pressão econômica por rapidez na entrega dos projetos levam arquitetos e engenheiros a desenvolverem soluções padronizadas para os edifícios. Mas, quando a demanda é por uma arquitetura de solução complexa, os engenheiros continuam oferecendo adaptações de soluções padronizadas para o desenvolvimento da estrutura. As ferramentas digitais e o design estrutural baseado em desempenho permitem que soluções não padronizadas sejam criadas para problemas estruturais, onde a forma não é somente pré-concebida e posteriormente otimizada, mas o design surge da complexidade exigida para a solução (Schwitter, 2005).

Para Bechthold (2012), na engenharia estrutural o desempenho já é há muito tempo uma disciplina mais evidente. Desde os arcos romanos até as catedrais góticas, pode-se perceber as forças aplicadas como base para a geração da estrutura.

O conhecimento de engenharia estrutural começou a se separar da arquitetura no princípio do século XIX (BETHTHOLD, 2012). Após essa separação, a engenharia se desenvolveu cientificamente, mas se afastou cada vez mais dos princípios de proporção e estética. A eficiência quantitativa se tornou um domínio da engenharia, se especializando em quantificar o comportamento, a estabilidade, as forças e a rigidez da estrutura.

No século XX o cálculo estrutural se desenvolveu no sentido de minimizar o peso das estruturas, maximizando sua capacidade de suportar cargas. Os modelos experimentais de processos de otimização seguiam as regras físicas da estrutura. Engenheiros-arquitetos como Luigi Nervi, Antônio Gaudí e Frei Otto são exemplos isolados, de profissionais que desenvolveram em seus trabalhos dogmas de eficiência estrutural aplicado à aspectos escultóricos no design de estruturas.

A primeira tentativa de se unificar os processos de projeto de engenharia e arquitetura utilizando métodos computacionais foi o desenvolvimento da cobertura da Ópera de Sydney (1957-73) (Fig. 2.15). O arquiteto dinamarquês Jørn Utzon e a empresa de engenharia Ove Arup & Partner's trabalharam no desenvolvimento de um sistema de casca que tornou o conceito original do arquiteto possível. Após muitos estudos, os engenheiros propuseram uma solução que consistia em um sistema de nervuras de concreto pré-moldado similar à forma de conchas criada a partir de seções de uma esfera. Esse sistema permitiu que cada nervura fosse construída por um número de segmentos padrão expressos num molde comum. O telhado demorou 11 anos para ser concluído, o que elevou os custos da obra e dentre outros motivos, fez com que o arquiteto abandonasse o projeto. Na etapa final da obra, o desenho original já havia sido bastante modificado em função das dificuldades estruturais e de construção. A forma final acabou sendo o resultado de pesquisas do escritório Ove Arup & Partners sobre material, estruturação e viabilidade da construção. Segundo Peres (2010) “a Ópera de Sydney pode ser considerada uma das principais construções do séc. XX e uma das mais incríveis estruturas já criadas”.

Figura 2.15 – Ópera de Sydney



Fonte: PERES, 2010

No início do século XX a inovação formal estava relacionada à consolidação do uso do concreto armado, pelas possibilidades formais que a substância plástico-líquida, que segundo Pedreschi (2008), criava para o desenvolvimento de superfícies de formas complexas. O ato de projetar estruturas estava ligado a um modo empírico de solução, conciliando intuição e análise estrutural. O que guiou a inovação propiciada por alguns engenheiros-arquitetos foram 3 aspectos intuitivos (PEDRESCHI, 2008):

- intuição do comportamento estrutural;
- intuição das ações (força, momento e equilíbrio);
- intuição da adequação do modelo estrutural a ser utilizado.

A relação entre força, forma e geometria teve seus estudos iniciais no século XVII com o estudo do potencial da catenária⁸ e sua correspondência com o comportamento do arco. O arquiteto espanhol Antônio Gaudí foi notável ao criar um sistema que conjugava a estrutura com a forma, dentre outros, no projeto da Sagrada Família, em Barcelona. Para Gaudí um elemento chave no seu método de concepção da estrutura foi a utilização do arco parabólico ou catenária, que utilizou como elemento mais adequado para suportar as pressões. Mediante a simulação com maquetes experimentais (Fig. 2.16) determinou a forma ótima da estrutura para suportar as pressões dos arcos e das abóbadas, primeiro na cripta da Colônia Güell e

⁸ A catenária é a curva natural que um cabo adota quando é suspenso.

depois na Sagrada Família. Gaudí desenvolveu um modelo dos quais se suspendiam pequenos sacos que simulavam os pesos, e assim determinava as forças e a forma da estrutura. Portanto, a partir do estado de cargas simuladas com os sacos, determinou experimentalmente a forma da estrutura, que reproduzia o modo ideal para trabalhar à tração, e que, quando invertida, obtinha a estrutura ideal para trabalhar à compressão.

Figura 2.16 – Maquete para concepção estrutural da Sagrada Família



Fonte: CIRLOT, 2001

No início do século XX, o engenheiro suíço Robert Maillart teve seu primeiro projeto de ponte construída. Suas pontes são resultado de suas pesquisas relacionando forma estrutural com as possibilidades do material. Na Fig. 2.17, vê-se o projeto da Salginatobel Bridge (1930), no qual a geometria global do arco foi desenvolvida através do diagrama da força do peso próprio da estrutura.

Figura 2.17 – Salginatobel Bridge (1930)



Fonte: PEDRESCHI, 2008

Similar a Maillart, Pierre Luigi Nervi (1891-1979) inovou com estruturas de concreto armado com cascas de fina espessura. A geometria de suas estruturas priorizava a simplicidade estrutural. Nervi utilizava a combinação de elementos pré-fabricados com concreto moldado *in loco*. No projeto do Exhibition Hall em Turim de 1949 (Fig. 2.18), pode-se ver a construção de uma abóbada de grande vão utilizando painéis pré-fabricados de ferro-cimento, que embora criasse uma simplicidade na montagem, gerava uma estrutura de grande complexidade estética.

Figura 2.18 – Estrutura do Exhibition Hall em Turim (1949)



Fonte: PEDRESCHI, 2008

O arquiteto espanhol Felix Candela também era fascinado pelas possibilidades de geometria e forma na arquitetura. Como Nervi, Candela buscava agregar simplicidade à construção. Em 1958 construiu um de seus mais famosos edifícios na cidade de Xochimilco, no México. Nesse projeto Candela mostrou sua habilidade em utilizar o mínimo de concreto para a produção de cascas de fina espessura de superfície hiperbólica (Fig. 2.19).

Figura 2.19 – Projeto de Félix Candela em Xochimilco, México (1958)



Fonte: PEDRESCHI, 2008

Podem ser citados ainda os trabalhos com cascas do engenheiro Heinz Isler, do engenheiro Eladio Dieste, e no Brasil, do trabalho do arquiteto Oscar Niemeyer em colaboração com o engenheiro Joaquim Cardoso.

Mais recentemente, trabalhando com estruturas de aço, o trabalho do arquiteto-engenheiro espanhol Santiago Calatrava é o mais significativo. Calatrava desenvolve estruturas inspiradas em formas orgânicas baseada no fluxo de forças da estrutura, podendo ser vistas em projetos como da Estação Oriente construída em 1998 em Lisboa (Fig. 2.20).

Figura 2.20 – Estação Oriente, Lisboa (1998)



Fonte: CALATRAVA, 2014

O trabalho de Frei Otto utilizando estruturas tensionadas também se destaca. Frei Otto trabalha com o princípio de que a forma estrutural e a arquitetura são indissociáveis. No projeto do Estádio Olímpico de Munique em 1972 (Fig. 2.21), até então sua obra de maior destaque, Frei Otto também aplicou o princípio da catenária para formar o limite inferior da cobertura. Um sistema estrutural hierárquico cria uma série de volumes variando a forma, a escala e as características de cada seção. Os mínimos componentes estruturais trabalham de modo a criar superfícies dinâmicas originadas por múltiplas conexões tensionadas, resultando em uma malha ondulada.

Figura 2.21 – Estádio de Munique (1972)



Fonte: ARCHDAILY, 2012

2.4.2 O novo estruturalismo

O uso do computador, tanto na arquitetura quanto no cálculo estrutural, afetou o processo de trabalho em ambos. Na engenharia, os programas computacionais foram introduzidos para facilitar o cálculo; na arquitetura, facilitaram os processos de representação. Os métodos analíticos de cálculo estrutural faziam com que os engenheiros trabalhassem com uma margem grande de segurança, e por isso os elementos estruturais eram superdimensionados. Com o cálculo computacional, o processo foi tendendo ao desenvolvimento de processos de otimização das estruturas.

Na arquitetura, os modelos foram se tornando cada vez mais sofisticados, possibilitando incorporar dados aos elementos. Com isso, foi possível incorporar aspectos de desempenho aos modelos, o que fez com que a linguagem dos programas de arquitetura se aproximasse cada vez mais dos programas de otimização estrutural de engenharia. Essa aproximação fez com que os profissionais se reaproximassem e pensassem numa reintegração de processos através das facilidades trazidas pelas ferramentas digitais.

No século XXI, a inovação formal está relacionada ao uso do computador e suas possibilidades de otimização e geração de estrutura e forma. Em uma 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. Essa abordagem foi denominada por Oxman e Oxman (2010) 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. Dessa maneira, a participação do engenheiro estrutural aparece nos primeiros estágios de geração da forma, criando um processo de pesquisa e produção do conhecimento comum entre arquitetos e engenheiros.

Tradicionalmente, a forma é concebida pelo arquiteto e posteriormente analisada e otimizada pelo engenheiro de estruturas. No desenvolvimento de estruturas de geometria mais complexas foi necessária a inversão desse processo (Fig. 2.22), onde primeiro é definido o material e os critérios de otimização, e posteriormente a estrutura e a forma vão sendo concebidas. Para Oxman e Oxman (2010), a engenharia de vanguarda aproxima a otimização

e a geração dos projetos estruturais com os conceitos de arquitetura, revertendo a maneira de pensar forma, força, estrutura e desempenho.

Figura 2.22 – Reversão na maneira de pensar forma, força, estrutura e desempenho



Fonte: adaptado de Oxman e Oxman (2010)

O *Novo Estruturalismo* é a integração de design, arquitetura, engenharia estrutural e tecnologias digitais. Nessa nova ordem, o design da forma se torna interdependente da construção, possibilitando a produção de formas não padronizadas (customizadas), complexas e curvilíneas. Dessa maneira, é necessário que se faça uma combinação entre os conceitos de arquitetura e otimização estrutural no desenvolvimento da forma. O estudo de geometrias orgânicas e as possibilidades de projeto arquitetônico através de algoritmos vêm redefinindo as possibilidades do projeto estrutural, possibilitando se pensar em estruturas não ortogonais, mas racionais e extremamente precisas. Algumas estratégias foram desenvolvidas para a geração de formas de geometria complexas. Os *softwares* paramétricos foram extremamente importantes no desenvolvimento desses conceitos. Eles são um meio de produzir design generativo, estrutural e iterativo, através de processos colaborativos entre arquitetos e engenheiros.

Oxman e Oxman (2010) afirmam que o *Novo Estruturalismo* integra a estruturação, a tectônica digital, a materialização da estrutura, a fabricação e a postura do projeto como pesquisa. A estruturação refere-se à relação das partes com o todo entre os elementos da estrutura. A sua resultante é a tectônica digital, que através de programas de parametrização, podem servir como base para análise de desempenho e procedimentos de síntese em processos colaborativos. A materialização é o estudo que permite viabilizar a fabricação e construção da

estrutura estruturada através da tectônica digital. E por fim, considerar cada projeto como uma oportunidade de pesquisa, criando uma cultura colaborativa de um processo de investigação de arquitetos e engenheiros como base na produção de um conhecimento comum.

O *Novo Estruturalismo* é uma primeira tentativa de definição da incorporação da lógica estrutural do projeto de engenharia à arquitetura através de tecnologias digitais emergentes (PEDRESCHI, 2008). Estruturação, *script* e fabricação tornaram-se base comum do conhecimento de arquitetos e engenheiros. Essa prática motivada por conceitos estruturais e características dos materiais contribui para a abordagem do projeto estrutural baseado em desempenho, seja de otimização ou geração da forma. Segundo Kolarevic (2005), os processos digitais baseados em desempenho abriram território para explorações conceituais, formais e tectônicas na prática de vanguarda da arquitetura, articulando uma morfologia arquitetônica focada em propriedades da forma emergentes e adaptativas. Ainda neste capítulo serão revisados os trabalhos de grupos e profissionais que incorporam ferramentas digitais ao processo colaborativo entre arquitetos e engenheiros de estruturas no desenvolvimento da forma estrutural, tendo esses trabalhos sido selecionados por terem produzido uma série de edifícios icônicos neste princípio de século.

2.5 Processos colaborativos de projeto utilizando ferramentas digitais

O pensamento algorítmico significa entender os resultados de um código generativo sabendo como modifica-lo, explorando novas opções, especulando e desenhando novos potenciais. Em função disso, os escritórios de arquitetura veem mudando sua estrutura, criando grupos internos de especialistas, contratando consultoria externa especializada e desenvolvendo práticas integradas com desenvolvedores de software (PETERS, 2013).

O paradigma de projeto baseado em desempenho, foca menos em questões formais e estéticas, e mais no material e na inteligência do design. A forma final não é tão relevante, o mais importante é a lógica que a define. Para desenvolver a forma baseada no desempenho estrutural, que é o foco deste trabalho, será descrito a seguir o trabalho de alguns engenheiros, arquitetos e equipes interdisciplinares que trabalham com esta filosofia projetual. O trabalho

de Cecil Balmond, tanto em seu escritório quanto no AGU⁹ são imprescindíveis para ilustrar esta metodologia.

Mas existem várias maneiras de se desenvolver estes projetos colaborativos baseados em desempenho através de ferramentas digitais paramétricas, algorítmicas e com análise estrutural realizada através de MEF. Peters (2013) coloca uma divisão de quatro diferentes tipos de abordagens destes processos.

O processo de trabalho mais comum que vem sendo desenvolvido é ter o designer computacional trabalhando num grupo interno de especialistas auxiliando as equipes de design. Com essa abordagem pode-se citar o *Specialist Modelling Group* (SMG) do escritório Foster+Partners e o trabalho do escritório de arquitetura e engenharia SOM.

Outra abordagem é a integração do design computacional ao processo de projeto. Essa prática tende a ser técnica e especializada, tirando vantagem das ferramentas computacionais para o desenvolvimento de projeto. Um exemplo é o trabalho desenvolvido pelo Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) da Universidade de Stuttgart.

Uma terceira abordagem colocada por Peters (2013) ocorre quando o computador é totalmente integrado ao processo, não tendo nenhuma separação entre as intenções de design e as técnicas computacionais, como no trabalho desenvolvido pelo engenheiro de estruturas Mutsuro Sasaki em colaboração com arquitetos como Toyo Ito e Rem Koolhaas.

Em uma quarta abordagem, Peters (2013) fala do desenvolvimento de modelos híbridos de softwares de arquitetura e engenharia para atender problemas específicos de projeto. Ainda não tendo executado muitos projetos, esses escritórios têm tido grande importância na produção de *softwares* e *plugins*. Dentre vários, pode-se citar David Rutten, desenvolvedor dos *plugins* de parametrização para *Rhinoceros*, *Grasshoper* e de otimização *Galapagos*; e Daniel Piker, criador do *plugin* de análise estrutural e simulação física *Kangaroo*.

Na sequência, serão mais bem apresentados alguns trabalhos dos grupos e profissionais citados para melhor entendimento da aplicação das ferramentas digitais nos processos colaborativos entre engenheiros estruturais e arquitetos tendo como ênfase o recorte do desenvolvimento do projeto estrutural. O foco será dado nas três primeiras abordagens, por estas já terem maior desenvolvimento do processo de trabalho.

⁹ *Advanced Geometry Unit at Arup*

2.5.1 SMG

Criado em 1998, o *Specialist Modelling Group* (SMG) é um grupo interno do escritório Foster+Partners com expertise em computação, geometria, análise ambiental, simulação e fabricação. Inicialmente, o grupo buscava no potencial do computador maneiras de se potencializar a eficiência energética das formas. Segundo Kestelier (2013), o objetivo do grupo era desenvolver técnicas para a criação de geometrias complexas e ambientalmente eficientes. O edifício Swiss Re Headquarters (2004) foi um dos primeiros projetos do grupo desenvolvido com design paramétrico (Fig. 2.23).

Figura 2.23 – Edifício Swiss Re Headquarters (2004)



Fonte: FOSTER + PARTNERS, 2014

Com a expansão do grupo nos últimos 20 anos, a equipe foi subdividida em duas, sendo a primeira com foco em computação, geometria e fabricação; e a segunda, especializada em análise ambiental e simulação. Os profissionais que compõem esses grupos, além de arquitetos, têm formação diversificada tais como em matemática, design industrial, engenharia civil e mecânica, programação e belas artes. Eles acreditam que a diversificação do grupo leva a soluções emergentes, diferente do que seriam as soluções convencionais. A comunicação tem sempre como base as ferramentas digitais, através de softwares paramétricos como o *Grasshopper* e sistemas generativos de componentes da Bentley Systems.

A maioria dos projetos é desenvolvida numa combinação de design paramétrico e desenvolvimento de *script*. Embora os processos sejam em sua maioria digitais, o grupo tem como filosofia sempre testar novos sistemas e equipamentos, também trabalhando com modelos físicos e desenhos manuais. Para eles, a tecnologia só é interessante quando as idéias são criativas o bastante para dirigi-las.

O projeto do British Museum em Londres (2000) descrito anteriormente neste capítulo também foi de autoria do SMG, tendo sua estrutura desenvolvida com base no desempenho de geração da forma.

2.5.2 SOM

O escritório de arquitetura e engenharia SOM tem tradição em trabalhos interdisciplinares desde a década de 60, criando um casamento entre novos conceitos estruturais e arquitetura com estética inovadora, resultando em obras com novos paradigmas estruturais e arquitetônicos.

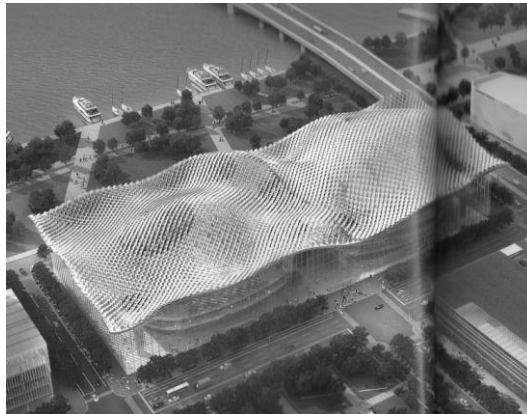
O SOM utiliza frequentemente softwares de Elementos Finitos para testar o desempenho estrutural e desenvolver o design de estruturas em processo colaborativo. A visualização gráfica dos dados em malhas de Elementos Finitos permite que os arquitetos visualizem o comportamento da estrutura, faça análises de tensões e deslocamentos, mesmo sem ter uma sólida formação em cálculo estrutural. Essa visualização permite que de maneira transdisciplinar seja possível fazer alterações no design da estrutura tendo em vista melhorias de desempenho.

A eficiência dos algoritmos de Elementos Finitos permite testar uma série de possíveis soluções em um curto espaço de tempo. Para otimização topológica, os engenheiros do SOM desenvolvem algoritmos genéticos (GA). A automatização de algoritmos de otimização podem ser utilizados para encontrar a forma ótima, mas a decisão sobre a forma final também agrega valores como estética e os custos envolvidos.

O GA desenvolvido pelo SOM foi primeiramente utilizado no projeto do Centro de Convenções em Tanggu, China (2009) (Fig. 2.24). A cobertura foi desenvolvida com uma série de ondulações com variações na altura requeridas para a performance do espaço. Os

arquitetos e engenheiros estavam interessados em encontrar a forma ótima de acordo com a distribuição de tensões, utilizando limites máximos e mínimos de altura. A forma encontrada foi um pouco descendente com relação à original, mas manteve as mesmas características idealizadas.

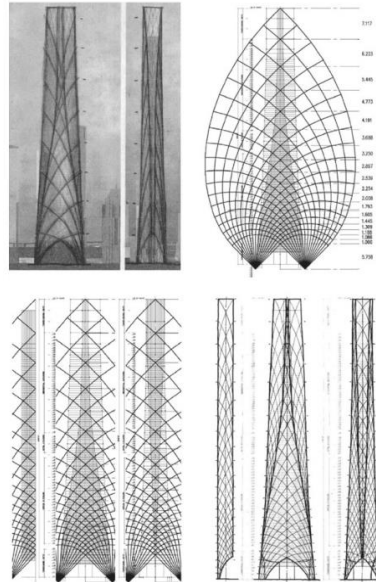
Figura 2.24 – Projeto do Centro de Convenções, Tanggu, China (2009)



Fonte: BESSERUD; KATZ; BEGHINI, 2013

O projeto da competição para a Transbay Tower em São Francisco foi um desafio para a equipe do SOM. A torre deveria ser projetada para elevados padrões de segurança estrutural devido aos riscos de abalos sísmicos. A forma estrutural final foi o resultado da acomodação das forças naturais na estrutura do edifício. Os engenheiros do SOM estavam desenvolvendo uma pesquisa baseada na específica derivação matemática do cantilever perfeito originalmente desenvolvido por Anthony Mitchell em 1904, e a utilizaram para compor o grid estrutural, oferecendo uma geometria forte e eficiente (Fig. 2.25).

Figura 2.25 – Estudos para a estrutura para da Transbay Tower baseado na derivação matemática do cantilever perfeito desenvolvido por Anthony Mitchell (1904)



Fonte: SOM, 2014

Ao contrário da crença convencional, o cantilever mais puro é em forma de bulbos, composta de linhas de fluxo de força radial. Fundada na sequência de Fibonacci e proporcional aos padrões espirais de um escudo do náutilus, o grid estrutural foi desenvolvido com um fator de escala mais concentrado em um ponto e em espiral para fora, tornando-se menos concentrada. Influenciado pelo cantilever, Sarkisian e sua equipe desenvolveram uma estrutura que responderia à concentração natural de força. De acordo com Sarkisian: "A forma em espiral proporciona resistência e baseia-se na idéia de que toda ação tem uma reação igual e oposta." A espiral tem a maior resistência no centro e menor resistência nos braços exteriores. As diagonais irradiam a partir dos cantos da torre, onde as solicitações são maiores e se transformam em geometrias mais abertas perto do topo onde as solicitações são mais baixas (Fig. 2.26).

Figura 2.26 – Padrão estrutural desenvolvido para a Transbay Tower



Fonte: SOM, 2014

Os arquitetos e engenheiros do SOM têm um espírito de colaboração e pesquisa já fortemente desenvolvido. Essa colaboração é facilitada pelo uso dos algoritmos computacionais que através de seus resultados, aproximam os grupos para análise e desenvolvimento de soluções para os problemas, permitindo que o desempenho quantitativo da ajude a definir estratégias formais.

2.5.3 ITKE

As ferramentas digitais oferecem aos engenheiros de estruturas uma oportunidade de quebrar as barreiras da maneira convencional de se pensar os modelos estruturais e incorporar novos processos de design e formas de interação.

A implementação de estratégias de geometria complexa possibilitada pelo design digital requer o desenvolvimento de ferramentas específicas de geometria e troca de dados. Enquanto os arquitetos trabalham em cada projeto no desenvolvimento de soluções únicas para atender as especificidades do lugar e da função do edifício, os engenheiros se colocam apenas como responsáveis pela integridade estrutural. Na formação do engenheiro estrutural, são aprendidas teorias mecânicas e a construção de um repertório de tipologias estruturais que

são constantemente replicadas, após avaliação e aprovação para o projeto em questão. As condições de contorno e as limitações da estrutura levam a escolha de um padrão estrutural específico. Segundo Knippers (2013) após a introdução da análise estrutural na segunda metade do século XIX, todas as estruturas passaram a ser desenvolvidas dentro do paradigma do cálculo.

O design computacional possibilita a introdução de uma nova maneira de se pensar modelos em engenharia estrutural, desfazendo a sequência convencional de projeto onde o arquiteto pensa a forma e o engenheiro a calcula e valida sua integridade estrutural.

Dimcic (2012) do Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) da Universidade de Stuttgart propõe uma metodologia de integração das três áreas de conhecimento (arquitetura, análise estrutural e programação) que possibilita a geração e a análise estática de qualquer estrutura. Nessa metodologia arquitetos e engenheiros trabalham em um processo colaborativo. Alterando-se os códigos para seguir determinadas exigências de projeto, é possível conseguir um design estaticamente eficiente.

Para Dimcic (2012), a otimização da estrutura ocorre através da combinação de automação dos parâmetros em linguagem C++ em um software de análise estrutural via MEF, até que a solução estaticamente mais eficiente seja encontrada. Como a análise também leva em consideração o design, e não somente as análises numéricas, podem ser encontradas formas ótimas derivadas do processo tanto com relação à eficiência estrutural quanto do ponto de vista estético e de usabilidade. Um dos exemplos de aplicação do método foi o projeto desenvolvido por Dimcic para a Expo Axis 2010 em Shanghai (Fig. 2.27), considerado uma das maiores coberturas de membranas já executadas no mundo.

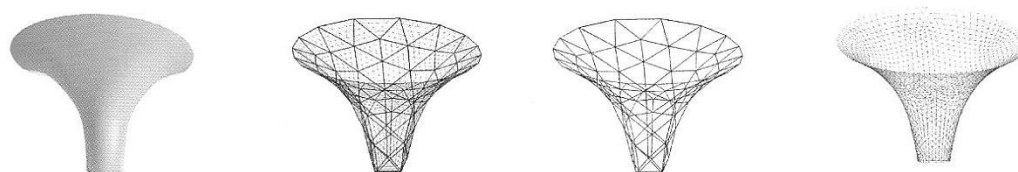
Figura 2.27 - Estrutura desenvolvida para a Expo Axis 2010 em Shanghai



Fonte: KNIPPERS, 2013

Para o desenvolvimento do grid estrutural foi necessário triangular a superfície em grandes triângulos, e estes foram ajustados manualmente. Após essa primeira triangulação, os triângulos foram subdivididos em triângulos menores de geometria idêntica. Utilizando as estratégias de Buckminster Fulher¹⁰, partiu-se para a otimização da estrutura a partir de ferramentas de relaxamento dinâmico da malha, com o objetivo de encontrar o tamanho das peças e os ângulos dos vértices (Fig. 2.28).

Figura 2.28 - Processo de desenvolvimento da estrutura



Fonte: KNIPPERS, 2013

A participação do engenheiro de estruturas nesse projeto não se restringiu ao desenvolvimento de detalhes construtivos e racionalização da geometria, mas abrangeu ativamente o desenvolvimento da malha e a definição do padrão estrutural, com transferência precisa dos dados para a fabricação e montagem das peças. A introdução do processo de fabricação digital exigiu dos profissionais (arquitetos, engenheiros e construtores) uma reinterpretação de todo o processo de projeto e construção. As fronteiras entre o papel dos profissionais estão em constante movimento, o que aumenta o potencial de inovação.

¹⁰ Buckminster Fuller ficou mais conhecido pela invenção do domo geodésico. As cúpulas geodésicas, propostas por Fuller, são a concretização das suas pesquisas no sentido de encontrar o máximo de eficiência na tecnologia das estruturas.

2.5.4 Mutsuro Sasaki

O engenheiro Mutsuro Sasaki foi um dos pioneiros no campo do design estrutural contemporâneo, que tornou possível a criação de estruturas com características de forma livre, fluídas e orgânicas, através dos processos de design generativo e desempenho. Professor na Universidade de Hosei, também tem escritório próprio desde 1980 em Tóquio. Tem colaborado com vários arquitetos na realização de edifícios inovadores como a Mediateca de Sendai do arquiteto Toyo Ito (1995-2000) (Fig.2.29).

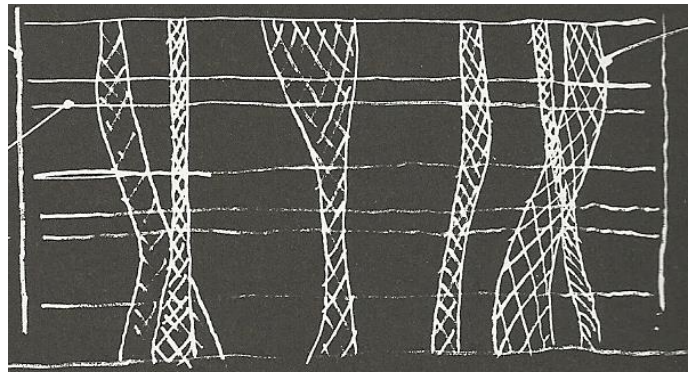
Figura 2.29 - Mediateca de Sendai



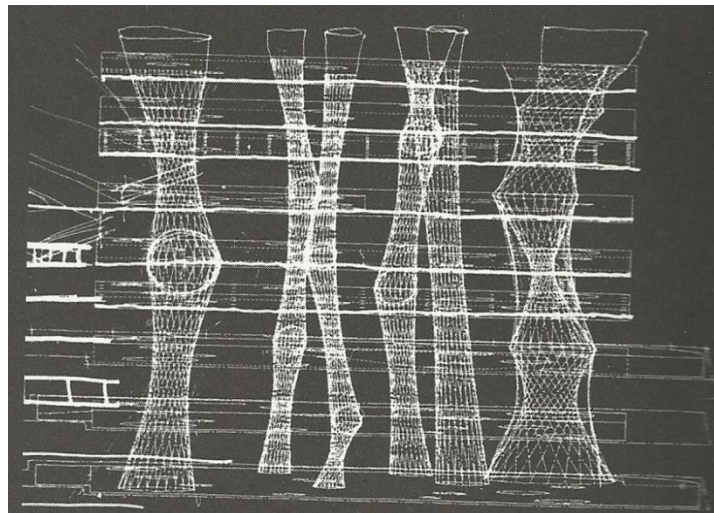
Fonte: MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008.

Esse projeto foi fundamental em sua trajetória por ter sido a primeira experiência de desenvolvimento da forma estrutural em um processo colaborativo com a arquitetura. A proposta da estrutura feita por Toyo Ito (Fig. 2.30) requereu um esforço muito grande para se concretizar devido às suas características amorfas e seu aspecto livre de gravidade, o que levou Sasaki a propor um sistema estrutural empírico de produzir formas estruturais livres de maneira racional.

Figura 2.30 - Croquis do projeto para a Mediateca de Sendai (a) croqui de Toyo Ito (b) croqui de Mutsuro Sasaki



(a)



(b)

Fonte: Fonte: MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008.

A partir daí, Sasaki desenvolveu novas abordagens metodológicas em resposta as demandas de projetos de arquitetura baseadas em princípios de evolução e auto-organização. Ele criou dois métodos para desenvolver estruturas de formas livres de maneira lógica; o primeiro se trata do Método de Análise Sensitiva, e o segundo é o *Extended Evolutionary Structure Optimization* (ESO).

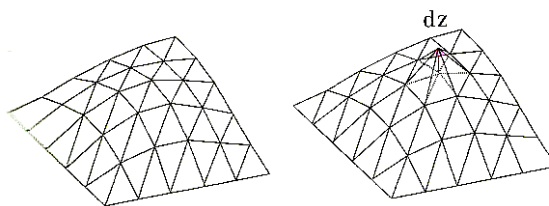
Os métodos criados por Sasaki envolvem a geração de uma forma estrutural racional utilizando métodos matemáticos que une estética e exequibilidade da estrutura. A seguir será feita uma descrição de cada um dos métodos.

2.5.4.1 Método de Análise Sensitiva

O Método de Análise Sensitiva foi desenvolvido para produzir lógicas para superfícies curvas o mais próxima possível do desenho inicial do arquiteto. Utiliza o computador como uma ferramenta de correção para transformar as formas orgânicas, amorfas, complexas e livres em uma estrutura possível de se construir, através de análise numérica.

A análise sensitiva é um método de otimização de cascas de curvatura livre. Sasaki se inspirou nos trabalhos desenvolvidos por Gaudí e Frei Otto. A forma resistente ideal desse tipo de casca é a que apresenta o mínimo estado de tensão e deformação possível. A equação fundamental é dada pela diferenciação da variável de referência, no caso, a energia de deformação do parâmetro z (Fig. 2.31). Quando um nó é alterado, os efeitos de deformação de toda a estrutura podem ser examinados. Após encontrar o coeficiente de sensibilidade para todos os nós, os gradientes de alteração da energia de deformação em todos os nós são verificados. Sendo assim, são revisados os valores e as direções de z nos nós de tal maneira a se reduzir a deformação em toda a estrutura.

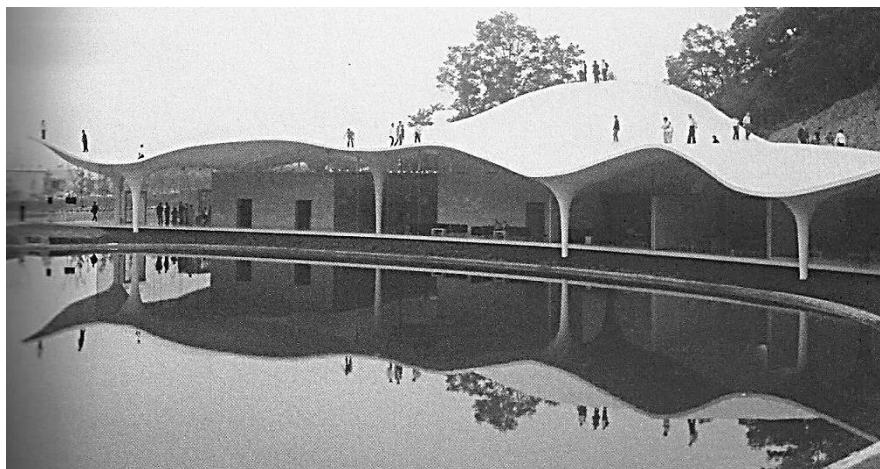
Figura 2.31- Deformação do parâmetro z



Fonte: MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008.

A forma inicial a ser analisada deve ser muito próxima da forma final desejada, para que o algoritmo de otimização possa rapidamente avaliar e transformar a estrutura. Um exemplo de aplicação do método é o projeto do Kakamigahara Crematorium desenvolvido em colaboração com o arquiteto Toyo Ito (Fig. 2.32).

Figura 2.32 - Kakamigahara Crematorium



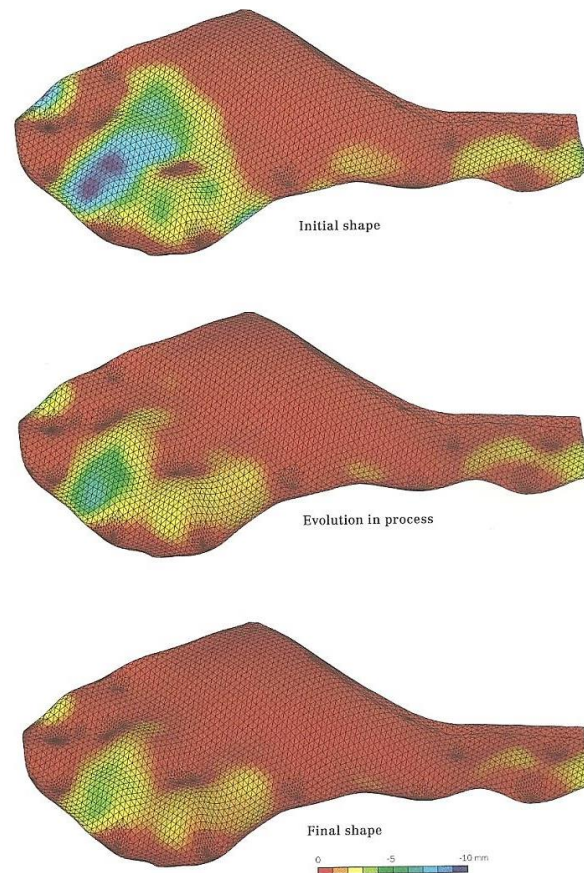
Fonte: MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008

A cobertura foi concebida com uma forma inicial arbitrária com a geometria pré-determinada em 80 metros de comprimento e 60 metros de largura, com a expectativa de 20 centímetros de espessura da casca. As condições de contorno também foram definidas, tendo colunas cilíndricas distribuídas ao longo do perímetro, suportando cargas de 6 kN/m^2 , uniformemente distribuídas em toda a cobertura.

Esta geometria foi submetida ao método de análise sensitiva, de tal forma a se minimizar a deformação sem alterar significativamente a forma concebida pelo arquiteto. A casca foi discretizada em uma malha triangular de elementos finitos e submetida à análise através do software comercial NASTRAN. A otimização foi feita através de um algoritmo desenvolvido por Sasaki.

Na Fig. 2.33 vê-se a sequência de deformações verticais da forma inicial à forma final. Percebe-se que a evolução da forma reduziu drasticamente a quantidade de deformação.

Figura 2.33 - Análise de deformações da cobertura do Kakamigahara Crematorium



Fonte: MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008.

2.5.4.2 *Extended Evolucionary Structure Optimization (ESO)*

É um método usado para gerar a forma estrutural mais eficaz para as condições geométricas e de carregamentos. O computador é utilizado para criar uma forma que elimina materiais onde o nível de tensão é baixa, o que aumenta a eficiência da estrutura. Numa condição ideal, o nível de tensão em qualquer parte da estrutura deveria ser constante. Sendo assim, o algoritmo estabelece um critério de rejeição de elementos onde existe baixa tensão e o material é subutilizado. A tensão de Von Mises é utilizada como critério para essa análise de tensões.

Esse método foi aplicado pelo arquiteto Arata Isozaki para a competição de projeto da Florence New Station em 2003, onde a proposta era que forma da estrutura da cobertura fizesse uma analogia ao mecanismo das estruturas vegetais (Fig. 2.34).

Figura 2.34 - Projeto de Arata Isozaki para competição da Florence New Station (2003)

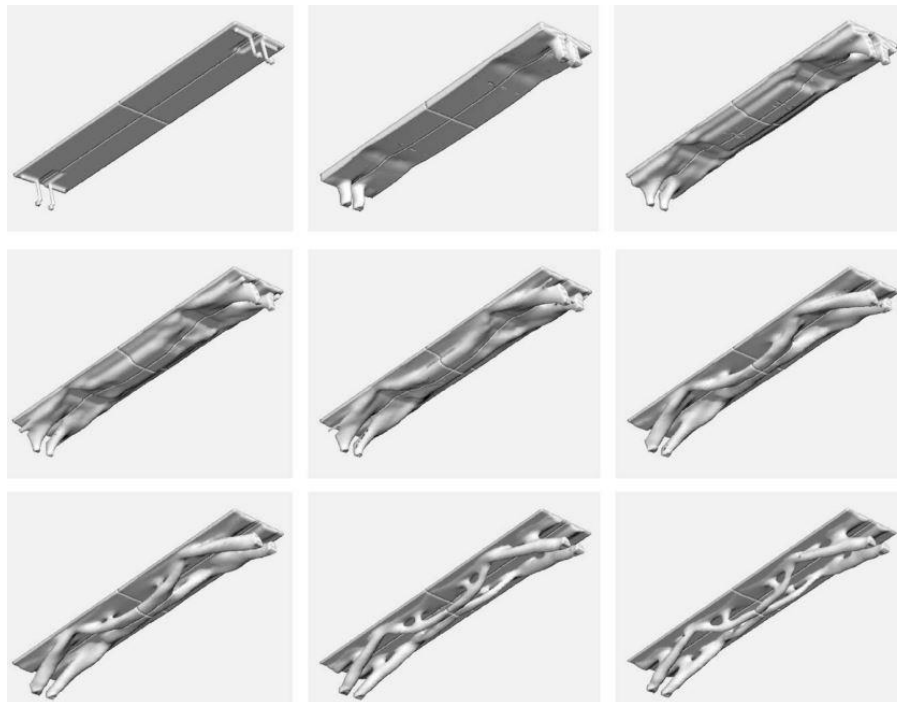


Fonte: MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008.

A idéia era minimizar a quantidade de material utilizada na estrutura através de estrutura orgânica que contemplasse a exigência de um vão livre de 150 metros, com largura de 36 metros e altura mínima de 12 metros.

Através do ESO o processo de evolução da forma foi sendo sucessivamente construído, utilizando o MEF para análise sob o Critério de Von Mises. Na Fig. 2.35 é demonstrada a evolução da forma, onde a estrutura vai assumindo a configuração de catenárias em função das forças aplicadas. Durante o processo, a forma começa a ficar mais esbelta, de tal maneira a se minimizar a quantidade de material. A otimização se deu no sentido de encontrar a forma estruturalmente mais racional, com eficiência máxima na distribuição de energia, sem desperdício mecânico e de material.

Figura 2.35 - Evolução da forma estrutural da Florence New Station



Fonte: MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008.

Embora o projeto da Florence New Station não tenha sido executado, Mutsuro aplicou o mesmo método ESO no desenvolvimento do Qatar Education City (Fig. 2.36) na cidade de Doha, em colaboração com o arquiteto Arata Isozaki. O projeto teve início em 2004, e a construção foi finalizada em 2011. O ponto de partida desse projeto teve como referência a forma final encontrada no projeto da Florence New Station, o que poupou uma quantidade enorme de cálculos computacionais. O projeto foi totalmente desenvolvido em um processo colaborativo, onde em todas as fases do projeto os arquitetos e engenheiros trabalharam juntos. Aos arquitetos cabiam as avaliações estéticas, e aos engenheiros a avaliação do desempenho mecânico da estrutura.

Figura 2.36 - Qatar Nacional Convention Centre (2011)



Fonte: FREARSON, 2013.

2.5.5 AGU

O AGU (*Advanced Geometry Unit at Arup*) foi um grupo interno criado na empresa de engenharia ARUP em 2000 pelo engenheiro e arquiteto Cecil Balmond. O grupo multidisciplinar composto por arquitetos, engenheiros e cientistas era dedicado a dar suporte às demais equipes de projeto com novas visões e soluções arquitetônicas, tendo feito em diversos projetos icônicos no início deste século como o *Serpentine Gallery Pavillion* do arquiteto Toyo Ito (Fig. 2.37), e a torre CCTV na Chima, do escritório OMA. O grupo adotou como princípios de construção da forma a complexidade e o desenvolvimento de dinâmicas internas e lógicas da estrutura. Com isso, surgiram projetos com uma nova estética, baseada na complexidade e na lógica.

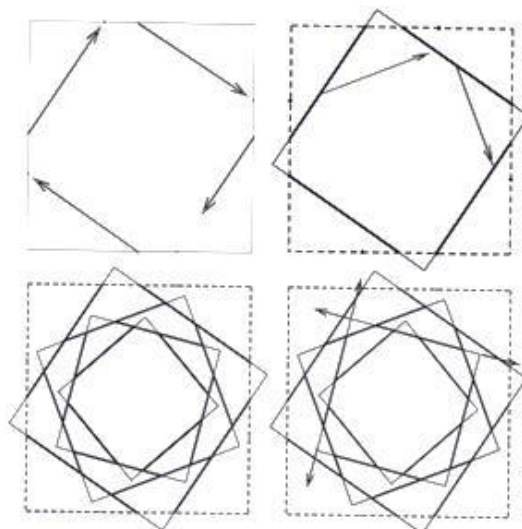
Figura 2.37 - Serpentine Gallery Pavillion (2002)



Fonte: MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008.

O projeto da *Serpentine Gallery* de 2002, foi uma oportunidade de se experimentar uma nova geometria utilizando algoritmos para otimizar e estruturar o espaço. Toyo Ito partiu do desenho de uma caixa composta por uma série de linhas que se cruzavam randomicamente (Fig. 2.38).

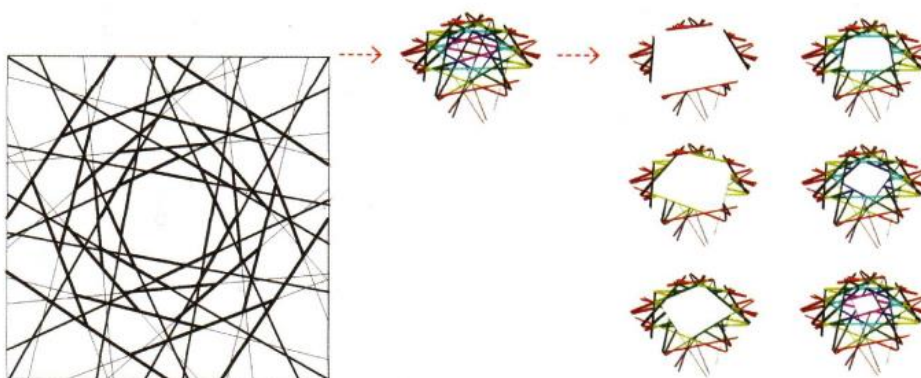
Figura 2.38 - Regra de geração da estrutura



Fonte: MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008.

O projeto iniciou-se com o desenvolvimento de um algoritmo que gerava um padrão complexo através de uma repetição recursiva. Foi criado um padrão baseado em regras que permitiram facilitar sua estruturação e construção. Após encontrado um padrão através das linhas, estas foram transformadas em chapas de 550mm de altura, que passaram a atuar como vigas. Foi criada uma hierarquia estrutural que estabeleceu uma hierarquia das espessuras, sendo estas de medida progressiva do centro para o perímetro, onde as tensões eram maiores (Fig. 2.39). O algoritmo generativo criou hierarquia e eficiência, o que ofereceu a oportunidade de subdivisão da estrutura em vários componentes, facilitando o transporte e a montagem no local.

Figura 2.39 - Definição de hierarquia da estrutura



Fonte: MEREDITH; SAKAMOTO; FERRÉ, 2008.

Embora o Arup Advanced Geometry Unit tenha acabado seu fundador Cecil Balmond continua desenvolvendo o trabalho iniciado no AGU em seu escritório próprio. A Arup continuou a desenvolver seus trabalhos utilizando muitos dos princípios desenvolvidos por Balmond, trabalhando sempre a inovação dos processos, restringindo orçamentos e aumentando a qualidade de soluções sustentáveis. Para a construção de geometrias complexas, continuou-se utilizando as ferramentas paramétricas, a otimização da forma e dos elementos componentes e a interoperabilidade entre os softwares. A Arup utiliza o *Grasshopper* para a construção da geometria paramétrica associativa e exporta para seu *software* interno de estruturação e análise por MEF, o GSA, que foi desenvolvido com a mesma base de dados. A Arup também possui softwares internos de otimização estrutural. O

próprio GSA cria o desenvolvimento dos perfis a serem utilizadas, as ligações necessárias, e gera as planilhas de quantificação do material que será utilizado para a construção.

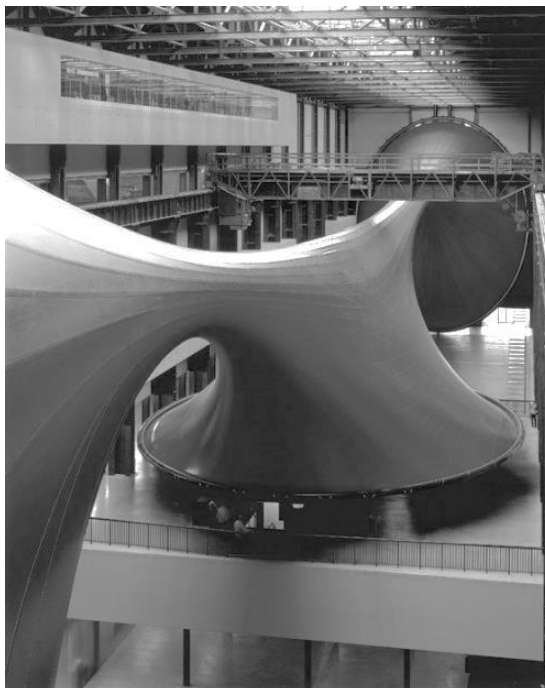
2.5.6 Cecil Balmond

O trabalho de Cecil Balmond é de extrema importância para a história contemporânea da arquitetura por este ter sido responsável por grande parte dos projetos de estruturas com complexidades não-lineares produzidas nos últimos 20 anos. Balmond tem formação em arquitetura e engenharia, e suas pesquisas se expandem para várias áreas do conhecimento tais como arte, design, engenharia, física, biologia e matemática. Em 2000 fundou o AGU na Arup, mas em 2010 criou seu próprio estúdio em Londres.

Os projetos desenvolvidos por Balmond (BALMOND, 2013), procuram desenvolver a noção contemporânea de fluxo. Ele tenta desconstruir a ideia de que o engenheiro estrutural é puramente racional e não criativo e o arquiteto é um artista intuitivo. Essa divisão vem da separação entre a ciência e a arte, que questionada por Balmond.

Em seu escritório, Balmond além de trabalhar em colaboração com arquitetos, também desenvolve trabalhos com artistas plásticos como Anish Kapoor. No desenvolvimento de exposições como a *Marsyas* na Tate Modern Turbine Hall (2002), Balmond descreve em seu livro *Crossover* (2013), o exaustivo trabalho para encontrar uma forma viável de se executar a estrutura, onde através de otimização da superfície, construção de modelos e análise do material, foi possível construir a maior escultura de tecido até então executada (Fig. 2.40).

Figura 2.40 - Exposição *Marsyas* na Tate Modern Turbine Hall (2002)



Fonte: BALMOND, 2013

Em colaboração com arquitetos como Rem Koolhaas, Toyo Ito e Álvaro Siza, Balmond desenvolveu edifícios icônicos da arquitetura contemporânea. Seu trabalho não se restringe a apenas um tipo de material. Balmond desenvolve conceitos para estruturas em aço, concreto e estruturas tenseis. Sua filosofia de pensamento é o que estrutura o desenvolvimento dos projetos.

No desenvolvimento do projeto da torre CCTV (2012) (Fig. 2.41), com Rem Koolhaas, após receber o desenho inicial do arquiteto, Balmond vislumbrou um cenário assustador: em uma área sujeita a terremotos, deveria desenvolver uma torre sem núcleo com uma grande massa se deslocando na vertical. A concepção da estruturação da estrutura só seria possível através de uma análise estrutural avançada.

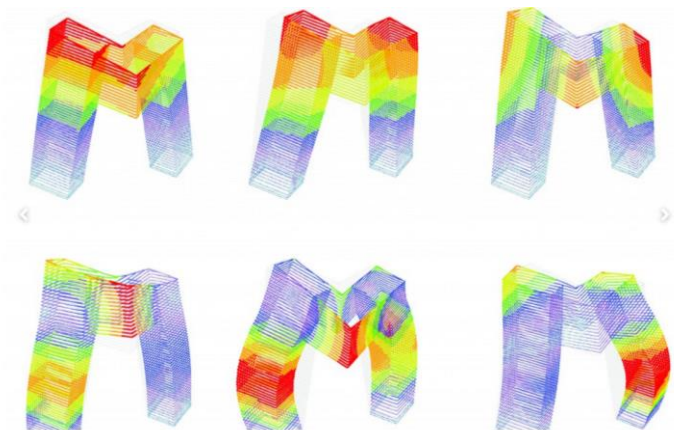
Figura 2.41 - Torre CCTV (2012)



Fonte: BALMOND, 2013

Para desenvolver o projeto, primeiramente foi feito um modelo físico para entender a natureza das forças. Sendo assim, em função das forças, começou a ser desenvolvida a estrutura do edifício. Vários testes foram feitos e problemas de toda ordem eram encontrados. A solução foi fragmentar o edifício e tentar a solução estrutural por partes. A análise estrutural só foi possível através do desenvolvimento de softwares com sofisticados pós-processadores. Após solucionar os problemas de carregamento, a estrutura ainda foi submetida a análise de vibração em função do risco de terremoto (Fig. 2.42).

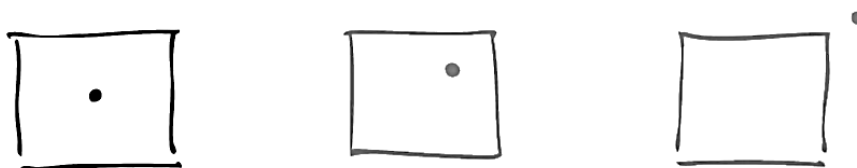
Figura 2.42 - Análise de vibração da estrutura



Fonte: BALMOND, 2013

Tendo como princípio que cada projeto é um processo de investigação, a complexidade é assumida como condição inerente à solução do problema, que deve buscar sempre uma maneira simples de ser solucionado. Para Balmond (2013), três modelos estruturam o pensamento do design. Na figura 2.43, ele os descreve graficamente da esquerda para a direita:

Figura 2.43 - Modelos de pensamento do design



Fonte: BALMOND, 2013

O primeiro modelo é o desenvolvimento clássico, onde o problema está no centro, contido numa caixa de solução. A ideia é de se desenvolver um único recurso de design. A hierarquia gerada é uma consequência desse pensamento. No pensamento clássico, os edifícios são objetos de beleza e contemplação. Estruturalmente, vigas e pilares são ortogonalmente interdependentes.

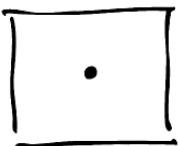
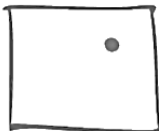
Na segunda solução, tem-se um pensamento desconstrutivista. O problema é deslocado, mas ainda está contido na solução. Distúrbios e distorções são permitidos, mas as hierarquias ainda estão ligadas ao pensamento clássico. A estética da distorção procura gerar sensações e dramaticidade, onde elementos estruturais declinam a ordenação ortogonal.

No terceiro modelo, vê-se filosoficamente o que se aproxima do pensamento da arquitetura algorítmica. O centro deixa a caixa, e, portanto deixam de existir limites para as soluções. A caixa fica livre para uma auto-organização, onde a complexidade se torna irreversível. As possibilidades passam a se relacionarem com os dados e funções, criando regras para as hierarquias da caixa. Nesse modelo, a estética está mais ligada à lógica do pensamento e à apropriação da tecnologia. Os edifícios se tornam um laboratório de ideias. As estruturas e seus elementos são desenvolvidos a partir da integração do todo com as partes, onde não é necessário saber os limites de ação de vigas e pilares. A estrutura se estabiliza

através do conjunto formado pela repetição de elementos. Até o final da montagem, a estrutura não se estabiliza, só sendo estaticamente eficiente na composição do todo.

No quadro 2.1, Balmond resume sua filosofia das três maneiras de se pensar o design estrutural:

Quadro 2.1 - Modelos de pensamento do design

			
Centro	fixo	deslocado	auto-organizado
Limites	fixo	partido	nenhum
Espaço	subdividido	único	múltiplo
Dimensão	2D	3D	4D
Modo	estático	dinâmico	emergente
Método	reduutivo	reduutivo	indutivo
Medida	escalar	vetorial	fractal
Estética	simétrica	distorcida	sobreposta

Fonte: adaptado de BALMOND, 2013

A filosofia de Balmond trabalha cruzando as fronteiras da arte e da ciência, recriando estéticas, e principalmente, desconstruindo maneiras de pensar ortodoxas que sugerem a divisão e alienação do trabalho, buscando uma nova maneira de pensar o ambiente construído. O que ele sugere é a coragem de se experimentar novas metodologias de trabalho, ligadas a outras disciplinas. Segundo Balmond (2013), a arquitetura assim como a matemática, prospera em incertezas.

No trabalho desenvolvido como objeto de estudo dessa dissertação, acredita-se que o processo esteja entre o modelo desconstrutivista e o modelo automatizado, porque embora se tenha uma automatização de algumas etapas de projeto, nem todas as decisões ocorreram de maneira auto-organizada externamente ao sistema.

3

PROJETO BASEADO EM DESEMPENHO APLICADO AO DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA DE TORRE EÓLICA

3.1 Objeto de aplicação do modelo

Como objeto de estudo e experimentação para aplicação da metodologia de Modelo Baseado em Desempenho, propõe-se a concepção da estrutura de uma torre do tipo treliçada de energia eólica. Para o seu desenvolvimento serão aplicados os seguintes parâmetros: geometria, forças usadas na geração da forma, técnicas, ferramentas, interoperabilidade e colaboração entre profissionais de arquitetura e engenharia.

A geometria da torre será o resultado de uma combinação de parâmetros que são as definições geométricas, as referências estéticas e as forças aplicadas devido ao equipamento, ao vento e ao peso próprio da torre.

As ferramentas utilizadas serão o *software* de modelagem geométrica *Rhinoceros* e o *plugin Grasshoper*, que propicia a criação de parâmetros para a geração da forma. Nesse processo será incorporada a análise estrutural no estágio inicial de desenvolvimento do projeto através do *plugin Scan&Solve*. A escolha dessas ferramentas procura atender ao critério da interoperabilidade.

A opção pela torre foi feita por se tratar de um objeto de geometria complexa o suficiente para a aplicação da metodologia de modelos baseados em desempenho. A torre de energia eólica requer uma solução que concilie estética, pois muitas vezes é colocada em locais de grande fluxo de pessoas, e até em locais turísticos, e otimização estrutural. Para sua geração,

a proposta é combinar os parâmetros necessários de geometria com as forças aplicadas à estrutura.

Este projeto vai à direção do considerável aumento no uso da energia eólica devido às suas características de sustentabilidade e inovação. Atualmente no Brasil, apenas 1% da demanda é atendida pela fonte eólica, e sua capacidade instalada é responsável por 2% da matriz elétrica do país (ABEEÓLICA, 2014). A maioria dos parques eólicos se localiza na região litorânea, mas foi detectado que no Brasil uma das regiões de maior potencial de vento situa-se no interior de Minas Gerais e Bahia, na região da Serra do Espinhaço.

Há um grande interesse em desenvolver parques eólicos nesta região de serra, mas existem alguns problemas como a dificuldade de instalação das torres nesses terrenos, muitas vezes localizados em regiões acidentadas e sem boas estradas próximas, a altura que elas deverão possuir para possibilitarem uma capacidade de geração de energia satisfatória, e em consequência disto, os problemas de montagem e transporte. Foi constatado que, as torres convencionais cônicas (monomastros) de 60 a 80 metros de altura, utilizadas em regiões litorâneas, não atendem a esses critérios.

É neste contexto que o objeto de estudo deste trabalho se situa: o desenvolvimento de um projeto de torre eólica para região montanhosa, mas que também possa ser utilizada em outras regiões, que alie estética a todas as demais questões de funcionalidade, de tal maneira que a torre seja sustentável também no sentido de não criar poluição e agressividade visual onde forem instaladas. O desenvolvimento do design da torre é de suma importância para o trabalho, e é o principal fator que demanda a participação do arquiteto no processo de concepção da forma da estrutura. Como as questões estruturais estão intrinsecamente relacionadas à forma, a proposta é que através de um processo colaborativo de design, com o uso de ferramentas digitais, se chegue a uma forma que tenha uma transparência e leveza estética, e uma otimização com relação à quantidade de perfis à serem utilizados, através da combinação de técnicas generativas e de análise estrutural.

Para o bom desenvolvimento do trabalho, é necessário que se entenda melhor o objeto de estudo, de maneira a compreender sua história, suas partes componíveis, os equipamentos a serem instalados, que mesmo não sendo o foco do estudo, auxiliam na compreensão do projeto como um todo.

3.1.1 História da energia eólica e suas utilizações

As primeiras torres a utilizarem o vento como força motriz remonta aos moinhos no Egito (1000 A.C.) e serviam para moer grãos e molhar os campos de arroz na China (644 D.C.). Na Europa, têm-se evidências para o mesmo uso no século XII. A aplicação para geração de energia elétrica surgiu em lugares rurais da Dinamarca no final do século XIX, e teve seu interesse aumentado após a Segunda Guerra Mundial.

No início do século XX, com a expansão da rede elétrica, foram feitas várias pesquisas para ampliar o uso de energia eólica. O primeiro cata-vento adaptado para a geração de energia elétrica foi feito por Charles F. Brush na cidade de Cleveland, Estados Unidos, e apresenta três importantes inovações: a primeira, a torre tinha uma altura de 18m, até então utilizada somente em moinhos; a segunda foi a introdução de um mecanismo multiplicador da rotação das pás; e, na terceira inovação, foi a primeira torre a combinar princípios de aerodinâmica e a estrutura dos moinhos com as inovações tecnológicas propiciadas pela energia elétrica (CRESESB, 2014).

Os avanços da indústria aeronáutica possibilitaram a construção de grandes rotores, necessários para o aumento da eficiência na geração de energia. A Rússia foi o primeiro país a desenvolver aerogeradores de grande porte. Vários projetos passaram a ser desenvolvidos em diversos países, mas antes da crise do petróleo, não se justificava os altos custos empregados no desenvolvimento da tecnologia empregada em torres eólicas face ao baixo custo do petróleo. Após a crise do petróleo em 1975, os Estados Unidos passaram a desenvolver alguns projetos com base nos estudos de Putnam e Hüter (1941). A concepção técnica desses projetos serviu de base para os projetos desenvolvidos até os dias de hoje.

Mas, só em 1982 que a Dinamarca concebeu o princípio de tripá com controle de aerodinâmica perdida. Iniciou-se uma fabricação em série de turbinas de pequeno porte, e estas começaram a ser exportadas para a Califórnia. A Alemanha também desenvolveu vários projetos de pesquisa com aerogeradores grandes. Após a década de 1990 houve uma grande expansão do mercado no comércio de aerogeradores. Atualmente as torres com 3 pás são as comercialmente mais utilizadas (Fig. 3.1).

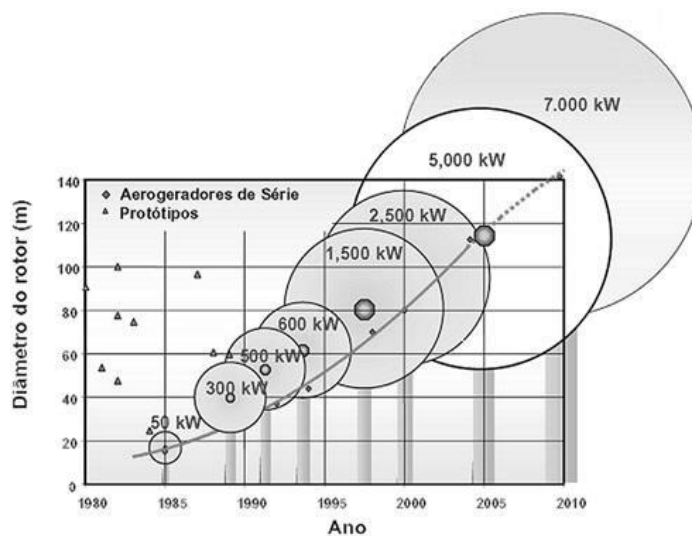
Figura 3.1 - Torre com 3 pás



Fonte: ANDREÄ, 2014a

O comércio de aerogeradores no mundo se desenvolveu rapidamente em tecnologia e tamanhos durante os últimos 15 anos. Pode-se ver na Fig. 3.2 um acentuado crescimento desde 1985 no desenvolvimento no diâmetro do rotor e da potência do equipamento. Esse desenvolvimento vem aumentando paulatinamente a capacidade instalada e o potencial da energia eólica no mercado, deixando de ser somente uma fonte alternativa de geração de energia elétrica.

Figura 3.2 - Evolução dos aerogeradores desde 1985 até 2005



Fonte: ANDREÄ, 2014a

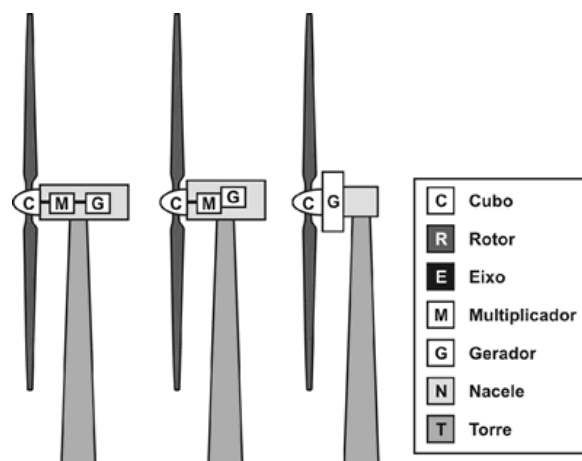
3.1.2 Componentes de um aerogerador

As torres de energia eólica são compostas basicamente por 3 partes: equipamentos, fundação e estrutura. A seguir será feita uma breve descrição de cada uma dessas partes e sua importância para o funcionamento da torre para concepção do projeto.

3.1.2.1 Equipamentos

Os equipamentos que formam o aerogerador são os maiores responsáveis pelas cargas que atuarão na estrutura da torre. Os principais equipamentos que compõem o aerogerador são a nacela, as pás, o cubo, o eixo, a caixa multiplicadora e o gerador. Nas torres de energia eólica, os rotores podem ser de eixos verticais e horizontais. Para o projeto da torre, será utilizado o de eixo horizontal que são os mais utilizados e podem ter diferentes configurações (Fig. 3.3):

Figuras 3.3 - Componentes de um aerogerador de eixo horizontal



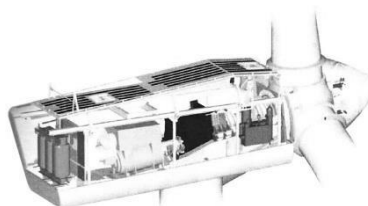
Fonte: CRESESB, 2014

A seguir, serão descritos os principais equipamentos que compõem o aerogerador para rotor de eixo horizontal:

a) Nacele

A nacele ou conjunto de eixo/acionamento é a caixa montada sobre a torre onde se localizam o gerador, a caixa de engrenagens, o sistema de controle, medição do vento e motores para rotação do sistema. Existem vários tipos de conjunto de acionamento: conjunto de eixo sem caixa de velocidade, conjunto de eixo integrado, conjunto de eixo separado e conjunto parcialmente integrado (Fig. 3.4).

Figura 3.4 - Nacele



Fonte: ANDREÄ, 2014a

b) Pás

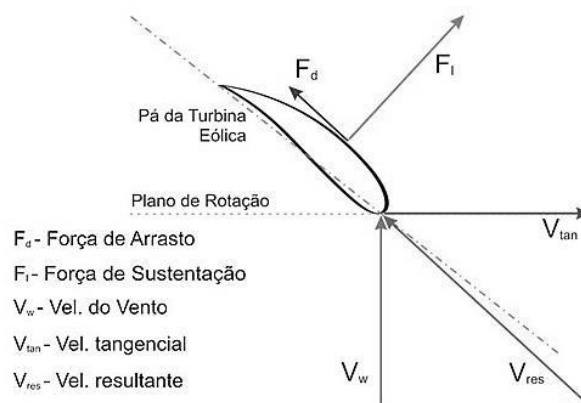
Os rotores de eixo horizontal são movidos por forças aerodinâmicas de sustentação e forças de arrasto, portanto as pás devem estar sempre perpendiculares ao vento. A obstrução do movimento do vento pelas torres faz com que ocorra ação de forças perpendiculares ao escoamento (força de sustentação) e de forças que atuam em direção ao escoamento (forças de arrasto). As forças de sustentação dependem da geometria e do ângulo de ataque. Os rotores podem ter uma pá com contrapeso, duas pás, três ou mais. Essas podem ter variadas formas e materiais.

O tamanho das pás e suas características de deflexão são fundamentais para a definição geométrica da estrutura da torre. Seu desenho aerodinâmico é o responsável pela conversão da energia cinética gerada pelos ventos em trabalho mecânico. Até a década de 1960 eram fabricadas em fibra de vidro e poliéster; na década de 1980 passaram a ser fabricadas em fibra de carbono, resina epóxi, aço e fibra de vidro; na década de 1990 também houve algumas fabricações em madeira; e nos anos 2000 têm sido feitas em fibra de vidro, fibra de carbono e resina epóxi. A fibra de carbono apresenta algumas vantagens, dentre elas seu alto coeficiente de rigidez e seu baixo peso em relação aos demais materiais. Os requisitos para a pá é que tenha o maior comprimento possível, pouca massa, boa dinâmica estrutural, aerodinâmica, durabilidade e economia de investimento e operação.

Alguns fatores influenciam na aerodinâmica como a corrosão do material, insetos, chuva e imprecisão na fabricação do perfil. Antes de entrar em funcionamento, as pás devem ser submetidas a testes de estática e de fadiga. Seu transporte também deve ser considerado, de tal forma que seja viável para o caminhão transportar uma pá de comprimentos maiores que 60 metros.

As pás são submetidas às forças de arrasto e sustentação. A força de sustentação é perpendicular ao fluxo do vento resultante (V_{res}), sendo o resultado do vetor de velocidade do vento incidente (V_w) menos a velocidade tangencial da pá do aerogerador (V_{tan}). A força de arrasto tem a mesma direção do fluxo de vento resultante. O torque do gerador é produzido pela força resultante da força de sustentação e arrasto na direção da velocidade tangencial (Fig. 3.5).

Figura 3.5 - Forças atuantes na pá do aerogerador



Fonte: CRESESB, 2014

c) Cubo

O cubo é uma peça mecânica de alta resistência responsável pela transmissão das forças das pás ao eixo do rotor. Seu desenho varia podendo ser rígido (para controle de aerodinâmica perdida e controle de ângulo de passo); controle de bater (para torres eólicas pequenas que funcionam a sotavento) e desenho oscilante (para mono ou bipá). O eixo é o responsável pelo acoplamento do cubo ao gerador, fazendo a transferência da energia mecânica da turbina (CRESESB, 2014).

d) Eixo e caixa multiplicadora

A transmissão da energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador é feita pela caixa multiplicadora ou caixa de velocidades. Ela deve estar localizada entre o rotor e o gerador. Sua tarefa é transformar a velocidade de rotação do rotor à velocidade adequada do gerador. A caixa multiplicadora tem dois tipos: com caixa de engrenagem reta e com multiplicador planetário. A caixa de engrenagens reta são para aerogeradores até 500kW.

e) Gerador

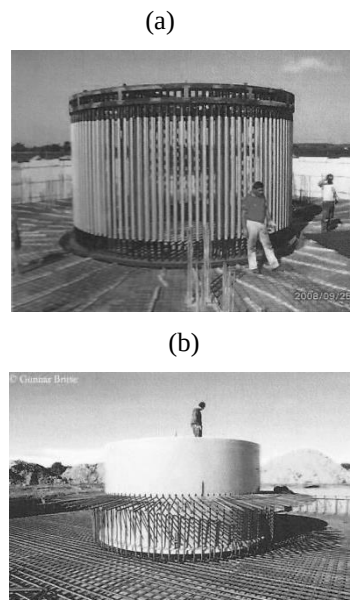
O gerador é a parte fundamental, pois é o responsável pela conversão de energia mecânica em energia elétrica. Os problemas encontrados na integração de geradores no sistema de conversão eólica envolvem as variações na velocidade do vento, as variações do torque de entrada, a dificuldade de manter frequência e tensão constantes, e a dificuldade de manutenção da máquina. Atualmente existem várias opções de geradores no mercado dentre eles geradores de corrente contínua, geradores síncronos, assíncronos e geradores de corrente alternada.

3.1.2.2 Fundação

No projeto que será desenvolvido, a fundação não será considerada, pois se trata de um protótipo genérico para ser instalado nas mais diversas regiões. Para o desenvolvimento da torre para um local específico, a escolha da fundação seria fundamental.

Os tipos de fundações mais comuns utilizadas para torres eólicas são as fundações planas ou de gravitação, e as fundações sobre pilares. As fundações planas são utilizadas em terrenos consistentes e tem uma base de gravitação. As fundações sobre pilares são utilizadas em terrenos fracos, pois têm sua base ancorada nas camadas mais firmes do solo. Em geral, as fundações são feitas em aço e concreto e sua conexão com a torre é feita através de um sistema âncora ou de um sistema de seção tubular (Fig. 3.6).

Figura 3.6 - Fundação de torres eólicas
(a) Sistema âncora; (b) Sistema seção tubular



Fonte: ANDREÄ, 2014a

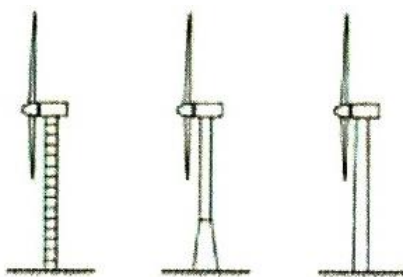
As vantagens do sistema âncora é que este permite uma boa distribuição de forças para a fundação e seu adequado tensionamento, porém seu custo é elevado. No sistema de seção tubular sua fabricação é simplificada, sua instalação é feita imediatamente após a secagem do corpo de base, o que torna o sistema com um custo mais baixo de fabricação e instalação. Sua desvantagem é na distribuição das forças e a alta qualidade requerida na fabricação para assegurar uma distribuição adequada de concreto na proximidade da seção (ANDREÄ, 2014a).

Alguns aspectos do terreno influenciam no comportamento da torre, como na sua rigidez estática e na rigidez dinâmica. A vibração que será transmitida à estrutura depende da qualidade do solo e da fundação. Para tanto, embora a fundação não seja considerada como fator determinante para a geração da forma da estrutura, numa segunda etapa de avaliação e otimização para execução, sua escolha seria imprescindível.

3.1.2.3 Torre

O objeto de aplicação do modelo deste trabalho é o desenvolvimento da estrutura da torre, através de seus parâmetros de geometria e forças. Para tanto, com a proposta de se pensar a reversão do processo de projeto, onde primeiro se define o material, a estrutura e depois surge a forma, é necessário que sejam primeiramente avaliadas as opções referentes ao material. Geralmente as torres são feitas de concreto (Fig.3.7) ou perfil tubular de aço (Fig. 3.8).

Figura 3.7 - Torres de Concreto

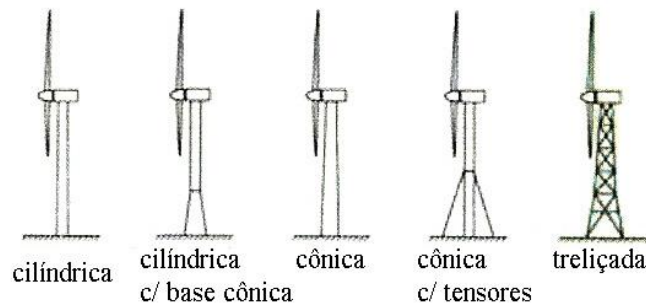


Fonte: ANDREÄ, 2014a

As torres de concreto tem o desenho cônico, são 5 ou 6 vezes mais pesadas que as torres de aço e necessitam de uma fundação mais robusta. Apesar da vantagem de construção no local ou com segmentos pré-fabricados, o peso e a robustez da fundação nas torres mais altas podem tornar o projeto inviável.

As torres híbridas, compostas de concreto e aço, com a parte alta em concreto e a baixa em aço, evitaria problemas com o transporte de peças muito grandes. Mas, pelo mesmo motivo com relação ao peso próprio, não seria uma solução interessante para torres tão altas.

Figura 3.8 - Torres de aço



Fonte: ANDREÄ, 2014a

O desenho mais comum atualmente é das torres cilíndricas ou cônicas em aço, de diâmetro máximo de 4,2m e espessura das chapas variando de 40 a 50 mm. Seu comprimento é partido em segmentos de 20 a 30m conectados com parafusos de alta rigidez. Mas sua altura, geralmente de 60 a 80 metros não atende a demanda especificada para o projeto.

As torres de aço estaiadas não seriam uma opção, pois são utilizadas para turbinas a sotavento e são mais comuns em torres eólicas de pequeno porte.

As torres treliçadas são as mais utilizadas quando grandes alturas são necessárias. Sua forma estrutural é a mais adequada aos esforços de flexão, com considerável ganho de peso estrutural. A facilidade de transporte dos componentes da torre faz com que elas possam ser transportadas em veículos convencionais, evitando gastos extras para isto. A fabricação e montagem também são facilitadas, pois dispensa a necessidade de chapas de grande espessura e procedimentos especiais de soldagem. Além disto, os equipamentos de montagem podem ser mais leves, o que é vantajoso em locais de difícil acesso.

Por essas razões, a torre treliçada foi escolhida para o desenvolvimento do projeto, principalmente em função da sua eficiência para grandes alturas e a facilidade de montagem no local, visto que o mesmo design deve ser eficiente para a aplicação no maior número possível de regiões.

3.2 Parâmetros para o desenvolvimento do projeto da torre

Este trabalho se concentrará no desenvolvimento de uma estrutura treliçada que atenda às exigências de projeto requeridas para a torre de energia eólica de grande porte. Para tanto, será aplicada a metodologia de projeto baseado em desempenho, combinando ferramentas digitais paramétricas e algorítmicas, onde a forma final da torre será o resultado do algoritmo gerador da estrutura e da análise estrutural preliminar da forma. Logo, é fundamental que inicialmente os parâmetros a serem utilizados estejam bem definidos. Os primeiro parâmetros a serem estabelecidos são referentes à geometria, ou seja, as exigências de dimensionamento e as referências estéticas para a forma da torre.

Para encontrar uma solução que atenda aos fatores estéticos, foram utilizados os princípios da Gestalt (GOMES FILHO, 2000). A Gestalt tem seis leis básicas: semelhança, proximidade, continuidade, pregnância, fechamento e unidade. Usando essas leis aplicadas ao design, podem ser geradas soluções alternativas para problemas comuns. No projeto da torre, estes princípios foram aplicados no sentido de ter se a percepção de uma forma contínua e suave, percebida de maneira uniforme e única.

Outro parâmetro importante, já que o modelo é focado no desempenho da estrutura, são as forças aplicadas devidas à carga do equipamento, vento e peso próprio da estrutura. As técnicas e ferramentas que serão aplicadas para propiciar que os parâmetros se transformem em um algoritmo gerador de diversas possibilidades formais são o que permitem que o modelo performativo seja eficaz para esta etapa de projeto de estudo preliminar.

3.2.1 Geometria

3.2.1.1 Dimensionamento

A torre eólica a ser desenvolvida neste projeto tem como proposta captar as melhores correntes de vento, que ocorrem nas maiores alturas, principalmente em regiões montanhosas,

onde os aerogeradores de maior potência podem ser mais eficientes, pois existem menos obstáculos à incidência do vento. Para que isto ocorra foi estipulada uma altura de 140 metros. Para a definição dos parâmetros de geometria e carregamento do projeto, a escolha da turbina foi fundamental. Para essas definições, foi escolhida uma turbina de 3MW com o rotor de aproximadamente 120 metros de diâmetro, com três pás, tendo tido como referência a GWT-3.0MW. Em consequência do diâmetro do rotor definiu-se que o topo deve ter 60 metros de altura e, a base, a altura restante equivalente a 80 metros.

Para o dimensionamento da base da torre, buscou-se casos relatados na literatura, como em Engström *et al.* (2010, p.40) onde o diâmetro da base adotado para uma torre eólica treliçada de 150 metros de altura com turbina de 3MW é de 30 metros. Portanto, este também foi o diâmetro médio adotado para o projeto.

Na parte superior da torre, a seção transversal deve ser constante e não apresentar nenhuma curvatura, de modo a permitir a instalação adequada do aerogerador e não interferir no funcionamento das pás, permitindo o giro das mesmas. O diâmetro de 5 metros foi adotado devido às simulações de casos de cargas extremas em Andreä (2014a) e suas investigações com relação à deflexão máxima da ponta da lâmina da torre. De acordo com Riziods *et al.* (2010), o desvio máximo da ponta para a torre (para um diâmetro de rotor de 126m) pode atingir até 10% do raio do rotor. Portanto, por questões de segurança, optou-se por adotar o valor de 5 metros de diâmetro, para que não haja preocupação com esses limites de deflexão das pás, garantindo uma distância suficiente para que as pás colidam com a estrutura.

Com as definições acima apresentadas, chegou-se ao seguinte dimensionamento para a geração da geometria da torre:

Tabela 3.1 - Parâmetros de dimensionamento da torre

Altura total	140 metros
Altura da base	80 metros
Altura do topo	60 metros
Diâmetro da base	30 metros
Diâmetro do topo	5 metros

Fonte: dados da pesquisa

Essas definições de geometria serviram como os parâmetros iniciais para a modelagem geométrica. A partir desses dados, começou-se a estudar a melhor maneira de viabilizar o projeto, definindo-se o melhor material, seção de barras e padrão estrutural para atender às possíveis solicitações.

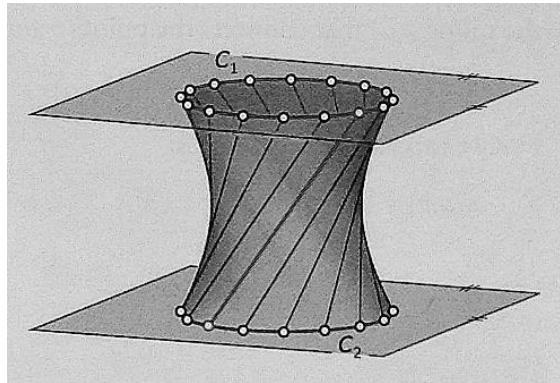
Além da solicitação estrutural, existiu uma preocupação com a estética da torre. Sua forma deveria contemplar aspectos qualitativos que permitissem que essas estruturas fossem inseridas de tal forma a não gerar poluição visual. Seus parâmetros geométricos levam a uma solução estrutural de torre treliçada, o que se verá melhor adiante, mas a solução comum desses projetos é muitas vezes insatisfatória visualmente, por não haver um projeto de design mais sofisticado, atento às proporções e aos detalhes construtivos. A estética desejada tem que apresentar uma leveza e transparência, com aspectos arredondados, de tal maneira que a robustez necessária à estrutura seja visualmente atenuada, sem que isto prejudique sua eficiência operacional, técnica e sua integridade estrutural.

3.2.1.2 Referências estéticas

Como referência para o estudo, buscou-se na literatura alguns exemplos de torres que além de sua função principal, tornaram-se referências estéticas e de design.

A geometria do hiperboloide (Fig. 3.9) foi uma referência de pesquisa para disposição da forma da torre e distribuição de barras, pois sua superfície permite a manutenção da integridade estrutural com a redução do uso de materiais, onde em cada um de seus pontos há duas retas distintas que cruzam a superfície. Ela tem sido utilizada em obras de engenharia e arquitetura desde o séc. XIX.

Figura 3.9 - Hiperboloide de uma folha



Fonte: POTTMANN *et al.*, 2007

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 às características dos hiperboloides. Essas superfícies duplamente regradas permitem a construção de malhas com vigas retilíneas, o que simplifica os trabalhos. Um exemplo de aplicação de hiperboloides de uma folha por Shukhov é a Torre Shabolovka (Fig. 3.10), uma torre de transmissão de energia com 160 metros de altura, construída em Moscou em 1920 (POTTMANN *et al.*, 2007).

Figura 3.10 – Torre de Shabolovka



Fonte: FOUNDATION SHUKHOV TOWER, 2014

Outro exemplo da aplicação da superfície do hiperboloide de uma folha é a Torre de Kobe (Fig. 3.11), na cidade de mesmo nome no Japão. Essa torre foi construída em 1963, com uma altura de 108 metros, e além de funcionar como torre de transmissão, também possui outras atividades em seu interior, servindo como um mirante para a população e tornando-se um marco urbano para a cidade.

Figura 3.11 – Torre de Kobe



Fonte: KOBE PORT TOWER, 2014

A Torre de Cantão, construída em 2009 na cidade de mesmo nome na China, com 600 metros de altura (incluindo a antena de 112 metros) teve o projeto de sua estrutura como resultado de um processo colaborativo entre os arquitetos holandeses Mark Hemel e Barbara Kuit com a empresa de engenharia britânica Arup, que se responsabilizou pelo cálculo estrutural. É uma torre de televisão multiuso e até a data de sua construção era considerada a torre mais alta do mundo. A forma foi desenvolvida com o auxílio de ferramentas digitais de design paramétrico, de tal maneira a se buscar a otimização da estrutura (Fig. 3.12).

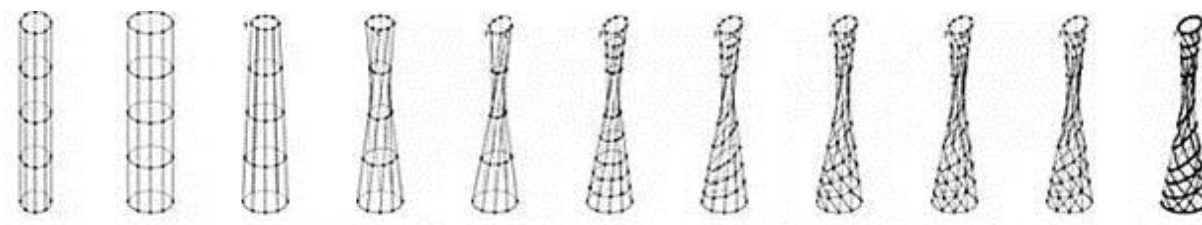
Figura 3.12 – Torre de Cantão



Fonte: CANTON TOWER, 2014

A forma, o volume e a estrutura foram gerados por duas elipses, uma no nível base e a outra no plano horizontal a 450 metros. Essas duas elipses foram rotacionadas uma em relação à outra. A contração provocada pela rotação entre as duas elipses formam um estreitamento na seção intermediária e um adensamento do material (Fig. 3.13). Sobre o processo de projeto, segundo o arquiteto Mark Hemel, “o recente estado da arte de fabricação e técnicas de análise computadorizada permitem que os designers criem estruturas muito mais complexas do que jamais haviam criado” (ARCHDAILY, 2010, tradução nossa)¹¹

Figura 3.13 – Processo de concepção da Torre de Cantão



Fonte: CANTON TOWER, 2014

¹¹ Recent State of the Art fabrication and computerized analysis techniques allow designers to create much more complex structures than ever before.

3.2.1.3 Definição da estrutura e material

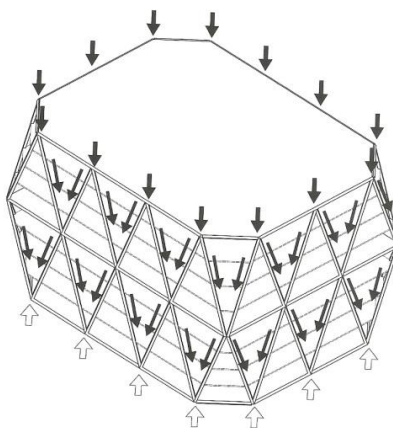
A partir do estudo das torres acima citadas, inicialmente decidiu-se adotar a superfície do hiperboloide como referência para o desenvolvimento do projeto. Definiu-se dessa maneira que primeiramente seria estudada a geometria em forma de casca, para na segunda etapa de desenvolvimento esta geometria ser transformada em uma estrutura treliçada espacial com barras diagonais.

Treliça é uma estrutura composta por barras retas formando unidades triangulares, cujas extremidades são ligadas em pontos conhecidos como nós. A estrutura treliçada permite que os perfis utilizados sejam mais esbeltos, o que garante uma maior eficiência estrutural com uma menor área de seção. Estaticamente, a estrutura treliçada tem capacidade de responder a momento fletor em vários eixos, pré-requisito necessário em formas verticais, onde forças laterais e cargas verticais excêntricas atuam simultaneamente. A estrutura treliçada suporta essas forças por meio de forças axiais de tração e compressão em suas barras, e às transmite 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 consequentemente a resistência às solicitações.

A treliça disposta em barras diagonais para grandes estruturas pode também ser chamada de Diagrid (*diagonal grid*). Assim como no sistema de treliça, o Diagrid é uma estrutura metálica formando pela interconexão de vigas diagonais, formando elementos triangulares ou quadrangulares, possibilitando grandes vãos no interior da estrutura. A distribuição de cargas é feita da seguinte maneira: as cargas verticais e horizontais são distribuídas ao longo das diagonais, sem interrupções, e para resistir à flambagem, barras horizontais ancoram os triângulos de maneira a evitar o colapso estrutural (Fig. 3.14). O ângulo de inclinação das barras no Diagrid deve ser sempre inferior a 45° na direção predominante do carregamento, o que aumenta a rigidez e a resistência aos momentos fletores, sendo muito mais eficientes do que uma malha ortogonal. Como o Diagrid trabalha através de malhas, ele possibilita uma maior variedade de formas. O Diagrid apresenta inúmeras possibilidades de configurações, podendo ser usados tanto para torres como para estruturas de formas livres em coberturas. Sua malha não necessita ser regular, o ângulo e a

escala de distribuição das barras podem variar de acordo com a solicitação da estrutura (MOUSSAVI, 2009).

Figura 3.14 – Sistema de distribuição de forças em um Diagrid vertical



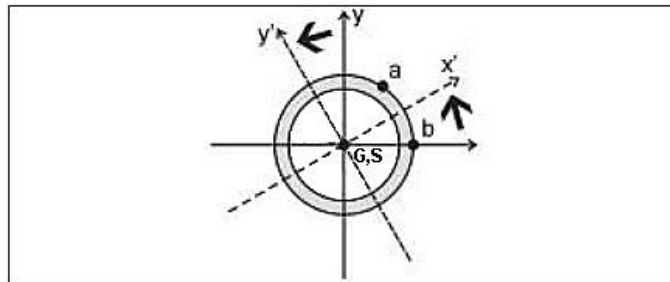
Fonte: MOUSSAVI, 2009

O Diagrid é a forma ideal para o desenvolvimento de estruturas generativas através de ferramentas digitais, pois trabalham através de malhas, respondendo à forças na diagonal. Portanto, para o desenvolvimento da estrutura da torre eólica, optou-se por adotar a estrutura treliçada de aço com a configuração de Diagrid.

A torre de energia eólica é uma estrutura análoga à de um edifício alto, e, portanto podem ser utilizados alguns conceitos estruturais aplicados nessas estruturas para o desenvolvimento da geometria em questão. Para edifícios altos submetidos à diversas ações, tendo a força horizontal (vento) grande importância, o sistema de estrutura em barras com malhas triangulares é o mais estável, por suas características de leveza e mecanismos de transmissão de carga (DIEZ, 2012).

Para a seção transversal das barras da estrutura, foram escolhidos os perfis tubulares circulares. 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. 3.15).

Figura 3.15 - Coincidência do centro geométrico (G), centro de cisalhamento (S) e simetria radial das seções tubulares circulares

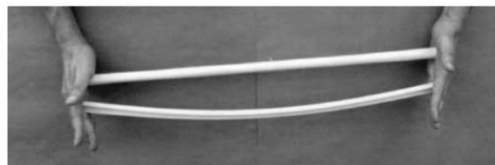


Fonte: adaptado de FIRMO, 2014

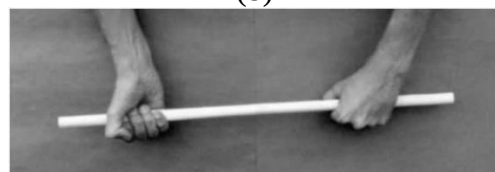
Com relação à compressão e torção das barras, submetendo simultaneamente um perfil “C” e um perfil tubular circular à força de compressão, observa-se que o perfil “C” estará mais suscetível à flambagem. Aplicando torção, o perfil circular também apresenta um melhor resultado (Fig. 3.16).

Figura 3.16 - Perfis tubulares e perfis “c” (a) Compressão em ambos os perfis; (b) Torção em perfil tubular circular; (c) torção em perfil “c”

(a)



(b)



(c)



Fonte: FIRMO, 2014

Ainda pouco utilizados como perfis estruturais no Brasil, os perfis de aço tubulares circulares apresentam inúmeras vantagens, sejam pelas suas características estéticas, geométricas ou mecânicas. Para difundir o uso desses perfis, se fez necessário o desenvolvimento de uma norma específica para sua utilização, devido a muitas particularidades do seu comportamento que não eram contempladas pela ABNT NBR 8800:2008. O desenvolvimento da norma ABNT NBR 16239:2013 teve como objetivo tornar o cálculo estrutural de perfis circulares acessíveis para o maior número de profissionais.

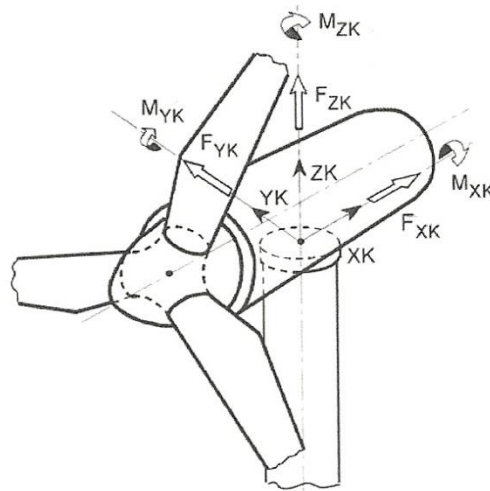
Para a torre, os perfis selecionados serão os perfis laminados tubulares circulares fabricados no Brasil pela Vallourec (VALLOUREC, 2014). A principal vantagem dos perfis laminados com relação às demais seções transversais é que eles são mais eficientes para esforços de compressão, classificados na melhor curva de resistência de muitas normas internacionais, o que garante uma vantagem competitiva. Sua inércia é constante em todas as direções, minimizando a necessidade de utilização de barras de travamento.

3.2.2 Forças e tensão resistente usadas na geração da forma

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 devidas ao equipamento (aerogerador), incluindo o efeito do vento nas pás, e força de vento na estrutura. O efeito da fadiga e as exigências relacionadas à frequência natural não serão consideradas nesta etapa de estudo preliminar, mas no cálculo estrutural final seria importante sua inclusão. 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.

Como sistema de coordenadas para aplicação das forças será utilizada a origem do sistema global fixada na cabeça da torre, fixa ao nacele (Fig. 3.17).

Figura 3.17 - Sistema de coordenadas global adotado para dimensionamento da torre



Fonte: ANDREÄ, 2014a

O aço utilizado será o VMB-350 Cor, produzido pela Vallourec e os perfis utilizados para a estrutura treliçada serão os tubulares circulares de aço patinável, sem costura, laminados a quente (Anexo A). Na tabela 3.2 está um resumo das propriedades mecânicas do aço utilizado:

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do aço VMB-350 Cor

Resistência ao escoamento	350 MPa
Resistência à ruptura	485 MPa
Módulo de elasticidade	200.000 MPa
Coeficiente de poisson	0,3

Fonte: dados da pesquisa

A análise estrutural será feita elasticamente pelo Método dos Elementos Finitos para obtenção da tensão de Von Mises solicitante de cálculo (σ_{sd}). Serão utilizadas as ações máximas possíveis, dentre as diversas combinações últimas de ações aplicáveis.

Para a tensão resistente de cálculo, será assumido o seguinte valor:

$$\sigma_{Rd} = \frac{\chi f_y}{\gamma_{a1}} \quad (3.1)$$

onde f_y é a resistência ao escoamento do aço, no caso igual a 350 MPa (ver tabela 3.2), γ_{a1} o coeficiente de ponderação da resistência do aço, igual a 1,10 conforme a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, e χ o fator de redução associado à resistência à compressão (leva em conta a instabilidade global das barras). Essa expressão foi utilizada considerando que todas as barras, dependendo do sentido do carregamento horizontal atuante, estarão submetidas à compressão axial ou à tração axial, sendo a compressão a situação mais desfavorável. Simplificadamente adotou-se para χ o valor de 0,80, correspondente a um índice de esbeltez reduzido da ordem de 0,90 (ver a norma brasileira ABNT NBR 16239:2013), ou a uma esbeltez igual a 60. Isso porque na treliça espacial a ser projetada, as barras terão comprimento reduzido e a esbeltez não deverá ultrapassar esse valor. A flambagem local não foi levada em conta, uma vez que os perfis laminados tubulares circulares da Vallourec possuem relação entre diâmetro e espessura de valor pequeno, impossibilitando a ocorrência desse modo de colapso.

Aplicando os valores de f_y , χ e γ_{a1} à equação 3.1, chega-se a um valor de σ_{Rd} igual a 254,54 MPa, que representa, obviamente, na análise estrutural, o valor máximo que a tensão pode alcançar. Acima desse valor, a forma analisada será considerada inapropriada.

As ações utilizadas para o cálculo foram retiradas do relatório de Andrea (2014). Nesse relatório são fornecidas as ações resultantes de todas as combinações últimas relevantes, com as ações majoradas pelos coeficientes de ponderação aplicáveis. Para o presente trabalho, foram adotados os valores de F_{Hres} , F_z e M_{res} , selecionados entre os valores mais altos de cada uma das combinações, representando assim, conservadoramente, os valores de solicitação na estrutura

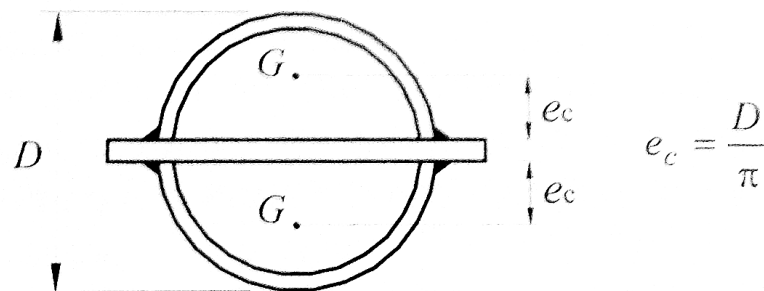
A força F_z deve-se ao peso próprio do equipamento. Para o cálculo do peso próprio do equipamento foi considerada uma carga aplicada no valor de $2,78 \times 10^6$ N. Também como carga vertical foi considerado o peso próprio da estrutura.

A força horizontal F_{Hres} é causada pela ação do vento na estrutura e no equipamento; foi aplicada no topo da torre e tem o valor de $0,955 \times 10^6$ N. O vento na estrutura foi considerado como uma carga concentrada no topo, porque pelo fato da estrutura ser vazada, sua carga distribuída é irrelevante.

O momento total resultante (M_{res}) a ser aplicado no topo da estrutura refere-se à soma do momento causado pelo peso próprio do equipamento e do momento causado pela ação do vento no equipamento.

O momento causado pelo peso próprio do equipamento ocorre devido à excentricidade do seu posicionamento. O seu cálculo é dado pelo produto do peso próprio do equipamento pela sua excentricidade e_c em relação ao eixo vertical da torre, que é igual a 1,5 metros. A excentricidade e_c é calculada de acordo com a Fig. 3.18:

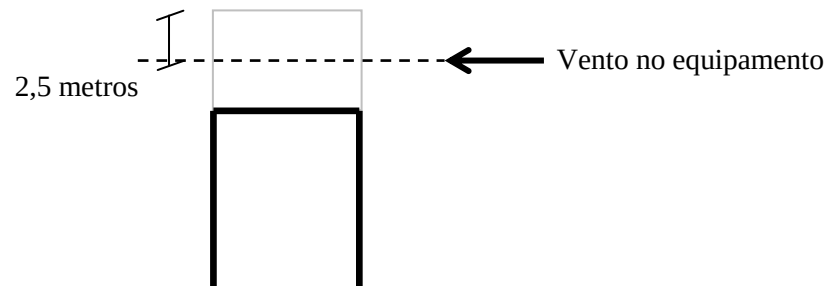
Figura 3.18 – Ilustração do valor e_c em seção tubular circular



Fonte: FAKURY, 2009

O momento devido à ação do vento no equipamento é dado pelo produto da pressão do vento no equipamento pela distância de 2,5 metros do ponto de aplicação da resultante dessa pressão à face superior da estrutura da torre (Fig. 3.19).

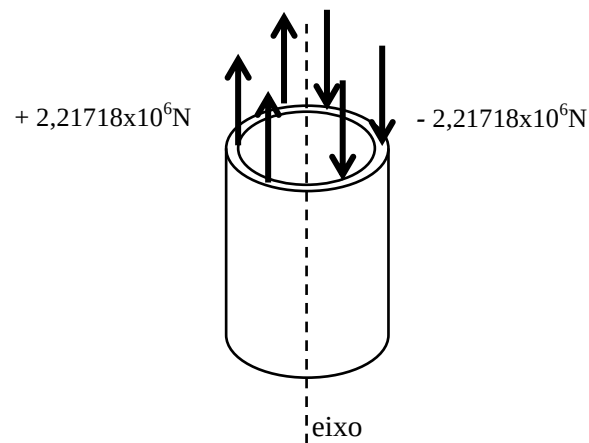
Figura 3.19 – Momento devido à ação do vento no equipamento



Fonte: dados da pesquisa

Em Andrea (2014), M_{res} tem o valor máximo de $14,115 \times 10^6$ N.m. Para facilitar sua aplicação no programa, esse momento foi transformado em um binário (Fig. 3.20), de forças equivalentes verticais iguais a ± 2217180 N aplicado na superfície superior da casca.

Figura 3.20 - Aplicação do M_{res} transformado em binário



Fonte: dados da pesquisa

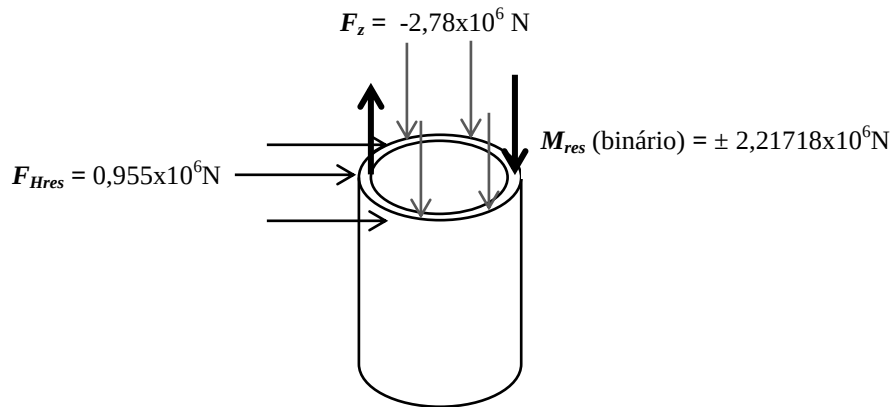
Tabela 3.3 - Resumo de cargas a serem aplicadas na análise por MEF

Carga permanente	-2780000 N
Força horizontal	955000 N
Momento total (aplicado como binário)	± 2217180 N

Fonte: dados da pesquisa

Na Fig. 3.21 pode-se ver como foram aplicadas as cargas F_{Hres} , F_z e M_{res} , no topo da torre para a análise computacional:

Figura 3.21 - Aplicação de F_{Hres} , F_z e M_{res} , no topo da torre



Fonte: dados da pesquisa

3.2.3 Técnicas e Ferramentas

3.2.3.1 Modelagem geométrica

A modelagem geométrica da torre treliçada será feita seguindo os preceitos da arquitetura paramétrica que se refere 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 são automaticamente redesenhados.

Para a geração da estrutura tridimensional, foi escolhido o software *Rhinoceros* (RHINOCEROS, 2012), 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.

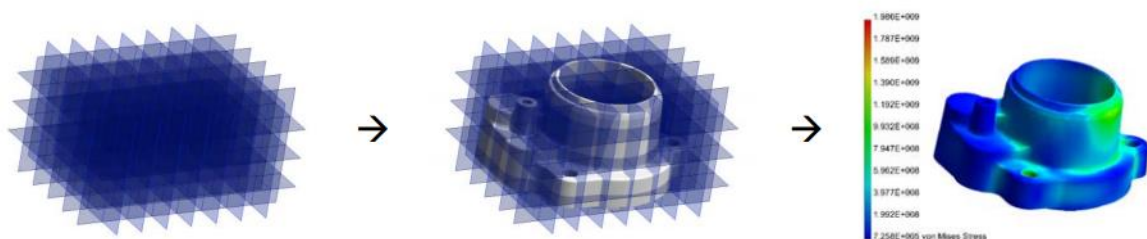
A principal vantagem do *Rhinoceros* é a infinidade de *plugins* que estão sendo desenvolvidos para ele. O *plugin* mais popular para o desenvolvimento de design paramétrico é o *Grasshopper* (GRASSHOPER, 2012), disponibilizado gratuitamente por seus desenvolvedores. Sua interface funciona através de diagramas, onde são desenvolvidos parâmetros, e estes resultam em geometria na interface do *Rhinoceros*. Os parâmetros vão sendo modificados interativamente com a visualização dos modelos tridimensionais, o que permite ao usuário uma técnica de modelagem 3D flexível e em tempo real.

3.2.3.2 Análise estrutural

Para a análise estrutural, foi escolhido o *plugin Scan&Solve* (SCAN&SOLVE, 2014), desenvolvido pela empresa Intact Solutions, primeiramente encubada na Universidade de Wisconsin, tendo se especializado em desenvolver aplicativos para soluções de problemas de engenharia. A tecnologia empregada no *Scan&Solve* exige dos usuários pouco conhecimento prévio em sistemas estruturais ou malha por elementos finitos.

O modelo gerado é uma simplificação de uma malha de elementos finitos, sendo uma tecnologia *meshfree* patenteada pela empresa. Segundo o fornecedor, o modelo é vantajoso por criar uma separação entre a representação geométrica e física do objeto, combinando-os quando necessário sem dispendar muito tempo com conversão e correção de erros da malha, preservando a maioria das vantagens de método clássico de análise por MEF. O modelo de análise é construído em um *grid* ortogonal uniforme, onde as funções de forma serão associadas com os seus vértices. O modelo geométrico coexiste no mesmo espaço, com sua forma nativa inalterada. Na Fig. 3.22 pode-se visualizar melhor como o modelo geométrico é imerso em um *grid* tridimensional.

Figura 3.22 - Metodologia *Scan&Solve*



Fonte: SCAN&SOLVE, 2009

Comparando o MEF e o Scan&Solve, pode-se perceber algumas similaridades e algumas diferenças:

Quadro 3.1 - Comparação entre MEF e *Scan&Solve*

MEF	Scan&Solve
Aproximação da geometria pela malha	Uso da geometria original
A malha deve resolver todos os erros geométricos	Erros geométricos são irrelevantes
O tamanho da malha é determinado pelo menor recurso	O tamanho da malha é definido pela necessidade do usuário
Condições de contorno definidas somente nos nós	Condições de contorno definidas para todos os pontos do contorno
Integração: pontos de Gauss de elementos finitos	Integração: pontos de Gauss determinados durante o processamento

Fonte: adaptado de SCAN&SOLVE, 2009

A formulação de Elementos Finitos clássica utiliza o Método de Galerkin, que é um caso particular do Método dos Resíduos Ponderados, equivalente ao Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV). O *Scan&Solve* utiliza o Método de Kantorovich, que calcula as distâncias do contorno até o ponto mais próximo da malha, o que simplifica os cálculos computacionais (SCAN&SOLVE, 2009).

O objetivo da etapa de análise estrutural neste trabalho não é a de se ter uma análise estrutural detalhada, no nível de um projeto executivo de estruturas. A escolha do *software* foi devido à sua possibilidade de efetuar uma análise simplificada, servindo ainda na etapa de concepção como auxiliadora do processo de criação. Portanto, softwares comerciais mais sofisticados como Ansys, Abaqus e SAP2000 não se enquadrariam na metodologia deste trabalho, embora tenham a possibilidade de se conectar diretamente ao *Grasshoper*, atendendo também ao critério da interoperabilidade, necessário para a adequada aplicação do Modelo Performativo.

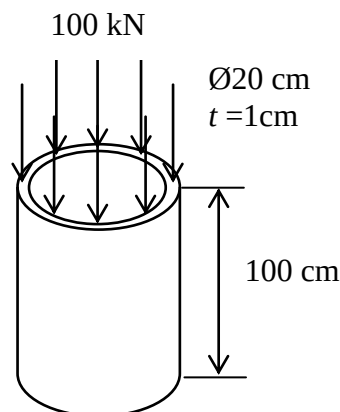
3.2.3.2.1 Solução analítica x *Scan&Solve*

Para testar a confiabilidade da análise feita pelo *Scan&Solve*, foram realizados dois experimentos comparando a solução analítica e a solução dada pelo programa para tensão e deslocamento. A proposta do experimento é validar a solução computacional em comparação com a solução analítica.

a) Experimento 1

Para o primeiro experimento, foi modelada uma barra de seção tubular com diâmetro de 20 cm, espessura de 1 cm e comprimento de 100 cm. Como condição de contorno, foi fixada a seção inferior nos eixos x, y e z. Na extremidade superior, aplicou-se uma força de 100 kN. A Fig. 3.23 mostra o problema, suas condições de contorno e a força aplicada, distribuída no perímetro da seção tubular.

Figura 3.23 – Barra de seção tubular para teste no *Scan&Solve*



Como definições do material, foram inseridos os mesmos parâmetros referentes ao aço VMB-350 da Vallourec. Para obter os resultados analíticos, a tensão máxima e o deslocamento máximo foram dados por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

onde σ é a tensão, F é a força aplicada e A é a área da seção transversal.

Considerando uma força F aplicada de 100kN, e a área A da seção transversal equivalente à área do anel com 20 cm de diâmetro e 1 cm de espessura, a tensão σ será equivalente a 1,67 kN/cm².

O encurtamento será dado por:

$$\Delta \bar{s} = \frac{\sigma \times h}{E} \quad (3.3)$$

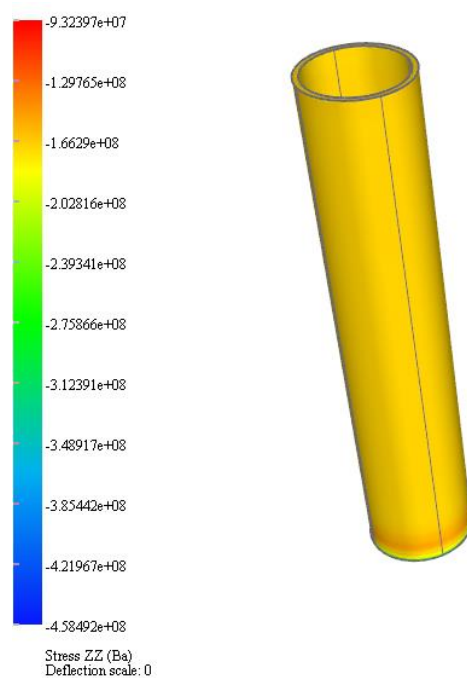
onde h é o comprimento da barra e E é o módulo de elasticidade do aço, tomado como igual a 20000 kN/cm².

Para a tensão σ de 1,67 kN/cm², comprimento h de 100 cm e módulo de elasticidade E de 20000 kN, o encurtamento $\Delta \bar{s}$ é de 0,0083 cm.

Aplicando o problema no programa, primeiramente foi testada uma malha mais grosseira, com 10000 elementos. O resultado da tensão no plano zz foi de 1,59x10⁸ kN/cm².

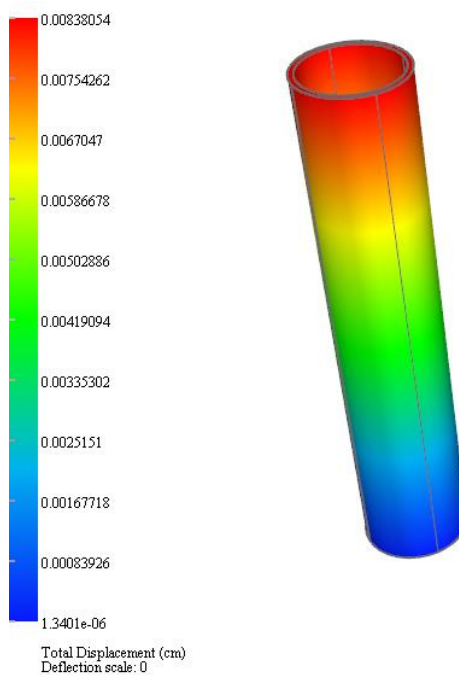
Como tentativa de aproximar o resultado da solução analítica, foram testadas duas malhas de resolução intermediária, uma com 152100 elementos, e outra com 304000 elementos. As duas malhas levaram exatamente ao mesmo resultado para a tensão (Fig. 3.24), que foi de 1,67 kN/cm² e de encurtamento (Fig. 3.25). Esse resultado foi o mesmo encontrado para a solução analítica.

Figura 3.24 - Tensão no tubo para malha de 152100 e 304000 elementos



Fonte: desenvolvido pela autora

Figura 3.25 – Encurtamento no tubo para malhas de 152100 e 304000 elementos



Fonte: desenvolvido pela autora

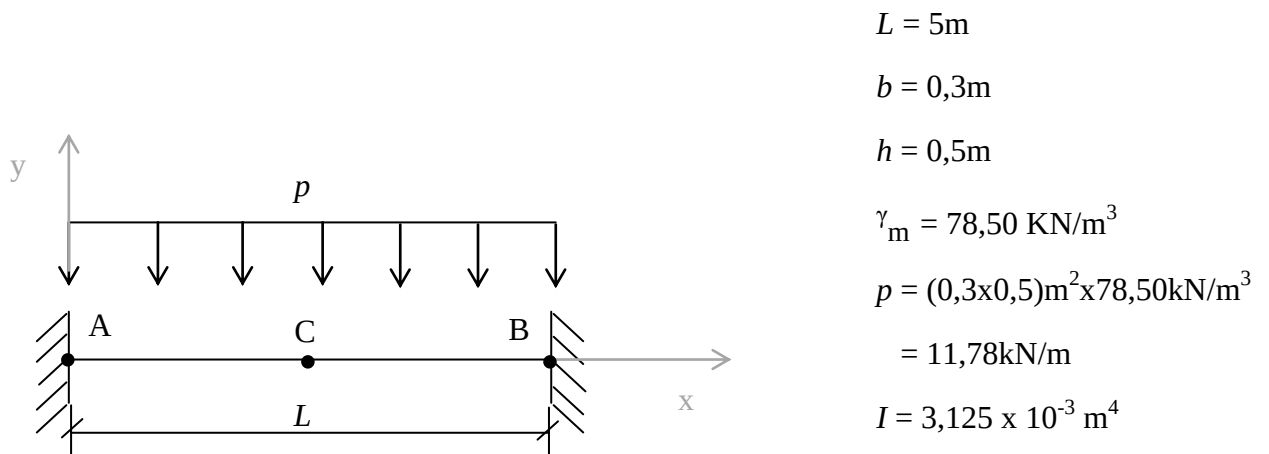
Foi ainda testada a malha mais refinada que o programa oferece, com 500000 elementos. A tensão máxima encontrada foi de $1,76 \text{ kN/cm}^2$. Esse valor ultrapassou em aproximadamente 5% o valor encontrado para a solução analítica, indicando que as malhas intermediárias foram as mais eficientes.

O resultado do encurtamento foi o mesmo para todas as definições de malha, igual a $0,00825 \text{ cm}$, ou seja. o mesmo valor encontrado na solução analítica.

b) Experimento 2

No segundo experimento, foi testada uma viga biengastada (Fig. 3.26) de aço de vão (L) igual a 5 m , seção transversal retangular com base (b) de $0,3 \text{ m}$ e altura (h) de $0,5 \text{ m}$, submetida a uma carga distribuída (p) constituída pelo seu peso próprio.

Figura 3.26 – Viga bi engastada para teste no *Scan&Solve*



Na solução analítica, os valores das reações de apoio e do momento na seção central são iguais a:

$$R_A = \frac{pL}{2} \quad (3.4)$$

$$R_B = -\frac{pL}{2} \quad (3.5)$$

$$M_{C(\frac{L}{2})} = M_{\max} = \frac{pL^2}{24} \quad (3.6)$$

As tensões máximas resultantes são:

$$\sigma_{\max(\pm)} = \frac{M_{\max(L/2)}}{I} \times y_{\max(\pm)} = \pm 981,27 \frac{kN}{m^2} \quad (3.7)$$

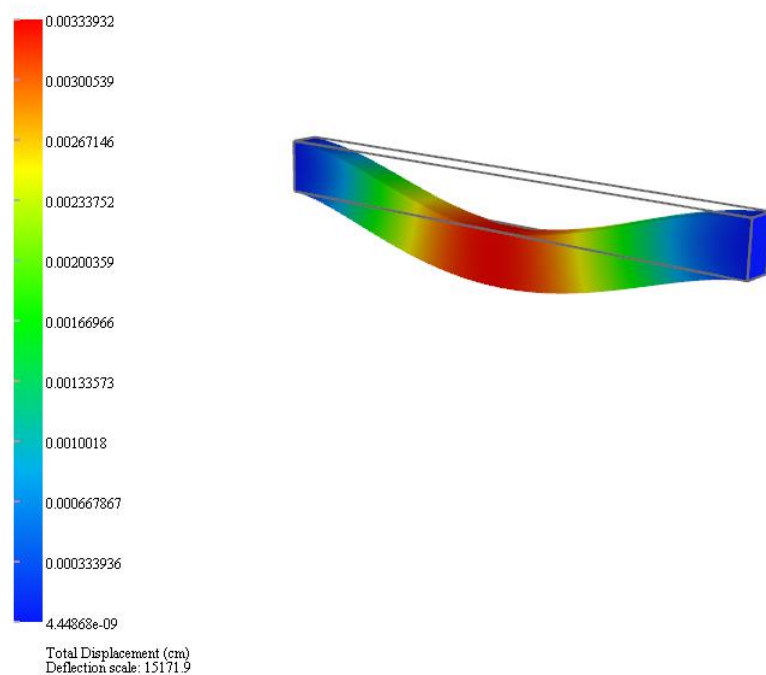
O deslocamento vertical máximo, que ocorre na seção central, é igual a:

:

$$\Delta \bar{s} = \frac{1}{384} \frac{pL^4}{EI} = 0,003cm \quad (3.8)$$

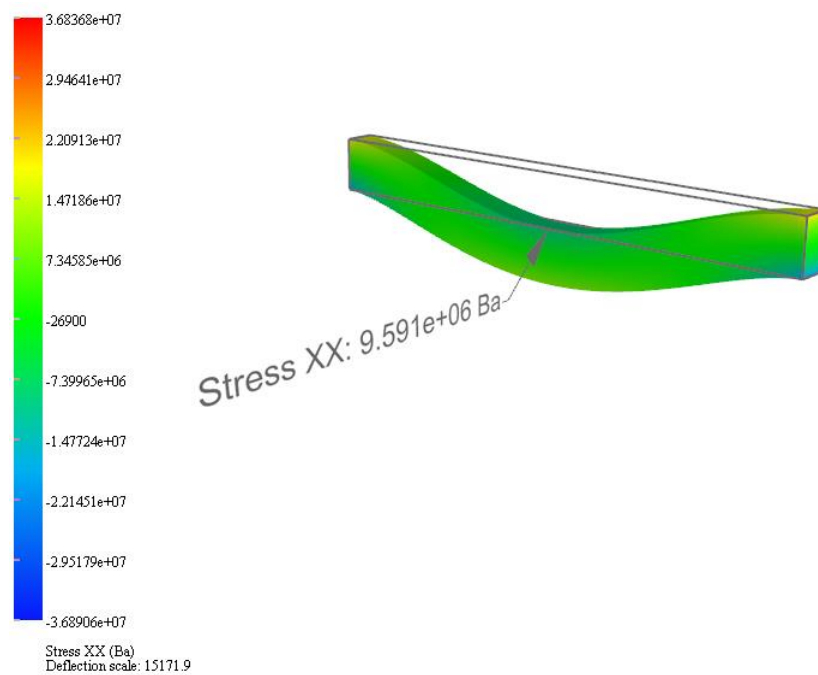
Na análise computacional, os resultados encontrados neste experimento com a viga ficaram bem próximos dos encontrados analiticamente. Como no primeiro experimento as malhas médias apresentaram os melhores resultados, foi selecionada apenas uma malha de 152100 elementos para teste. O deslocamento máximo encontrado foi de 0,0033cm aproximadamente (Fig. 3.27), o que é praticamente o mesmo valor resultante encontrado através da equação 3.8. A tensão máxima encontrada foi de 959,10 kN/m², ou 9,591 x 10⁶ Ba (Fig. 3.28). Comparativamente à solução analítica, houve uma diferença de apenas 2%.

Figura 3.27 - Deslocamento máximo da viga para malha de 152100 elementos



Fonte: desenvolvido pela autora

Figura 3.28 - Tensão XX da viga para malha de 152100 elementos



Fonte: desenvolvido pela autora

Com os dois experimentos apresentados, concluiu-se que a análise de tensões e deslocamentos através do *Scan&Solve* tem um grau satisfatório de confiabilidade, por apresentar resultados próximos aos da solução analítica. Dessa maneira, o programa apresentou-se eficiente para a proposta deste trabalho: fazer uma análise estrutural simplificada, de maneira quase iterativa com o *Grasshopper*, apresentando resultados que auxiliem no processo de concepção da forma da estrutura.

3.3 Desenvolvimento do projeto

3.3.1 Primeira etapa

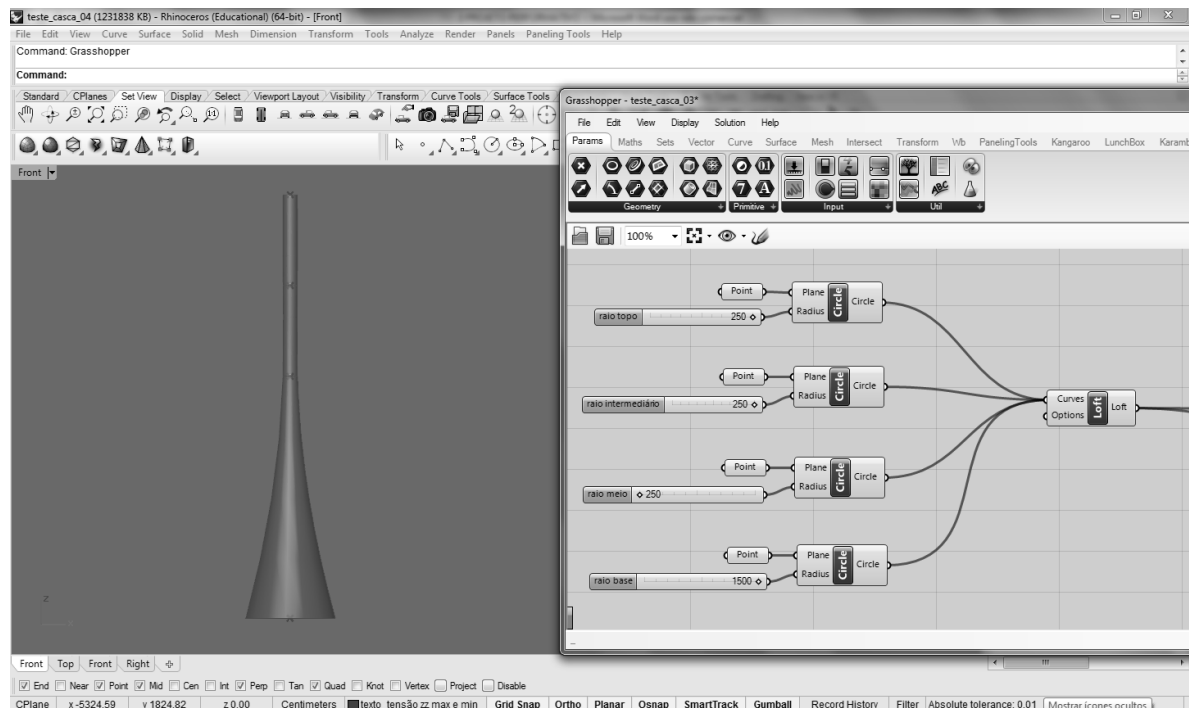
3.3.1.1 Modelagem da casca

A 1ª etapa de desenvolvimento do projeto consistiu em gerar uma geometria inicial em forma de casca com os parâmetros geométricos estabelecidos. O objetivo de primeiramente se gerar uma casca foi de definir uma forma inicial e fazer a análise e dimensionamento prévios dessa casca através do programa *Scan&Solve*, envolvendo a determinação das espessuras necessárias da casca, em vários níveis, para que a tensão solicitante não ultrapasse o valor da tensão resistente de cálculo, igual a 254,54 MPa, conforme o subitem 3.2.2. Essas espessuras servirão como referência na escolha dos perfis da estrutura treliçada. Esse procedimento permite variar com facilidade a disposição final das barras na torre, sem necessidade de novas análises estruturais. Assim, a estrutura treliçada a ser desenvolvida na 2ª etapa do trabalho pode ser feita de um modo otimizado.

Para os parâmetros de geração da casca, os dados iniciais foram a locação das coordenadas dos pontos de acordo com as alturas fornecidas, e posteriormente os raios dos círculos gerados a partir desses pontos, com os parâmetros de raios.

Após a geração dos parâmetros iniciais, a casca foi gerada pela ligação dos círculos através do comando *loft*, que cria uma superfície conectando os círculos, gerando assim o formato desejável para a forma final (Fig. 3.29).

Figura 3.29 - Parâmetros de dimensionamento da casca em *Rhinceros* e *Grasshopper*

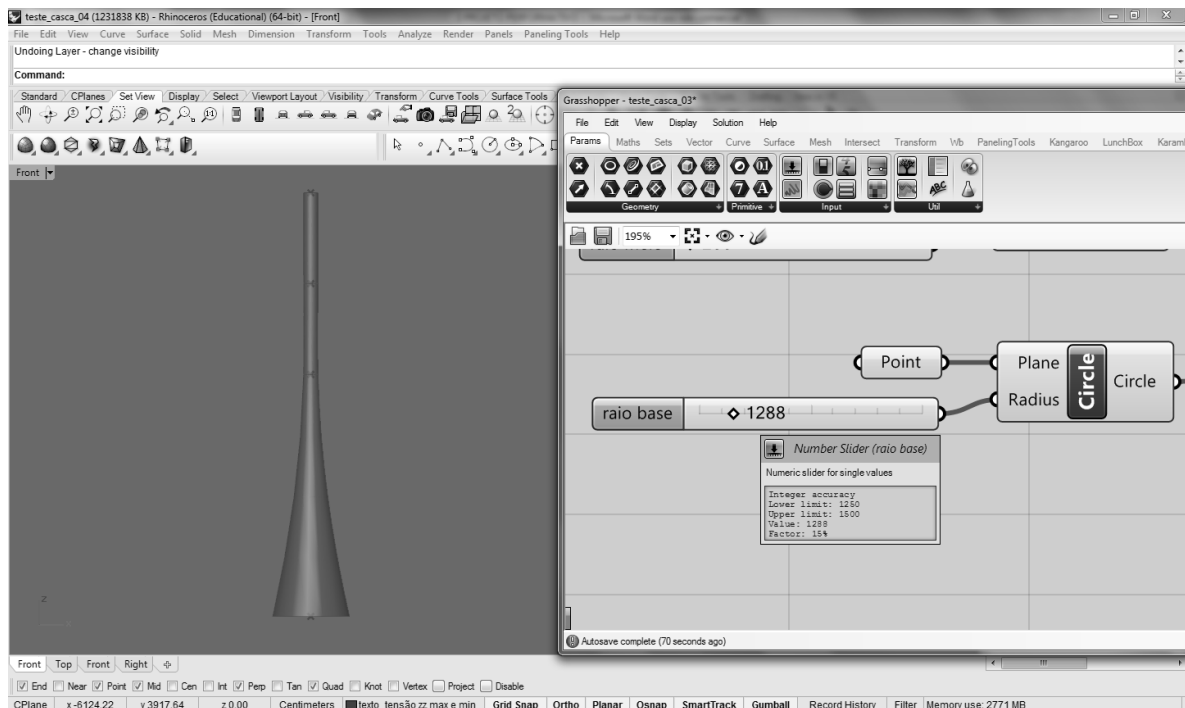


Fonte: desenvolvido pela autora

A modelagem geométrica feita através de parâmetros que permitem que haja variação da geometria através do seu controle numérico. Todos os círculos e suas coordenadas estão parametrizados, de tal maneira que a forma pode ser reajustada até o seu desenvolvimento final em estrutura treliçada. Por isto, também pode-se chamar esse tipo de modelagem de modelagem associativa. Na Fig. 3.30 pode-se ver em detalhe a variação de parâmetros e como isto proporciona a alteração automática da geometria.

A forma simétrica é em função do giro do gerador. Para captar o vento em todas as direções, é necessário que o equipamento tenha liberdade para girar 360°. Sendo assim, foram descartadas todas as possibilidades de assimetria da superfície da casca.

Figura 3.30 - Detalhe de variação de parâmetros

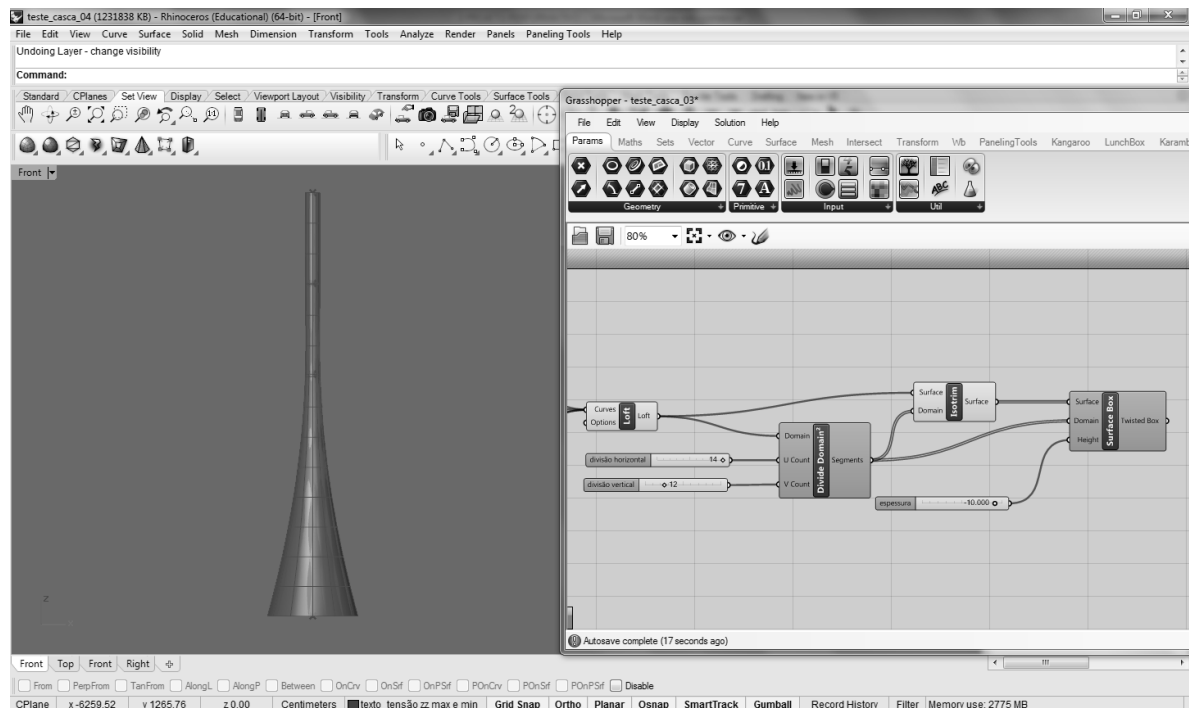


Fonte: desenvolvido pela autora

Após a definição da superfície, foram criados parâmetros de espessura. A espessura foi um parâmetro importante para a análise de tensões feita no *Scan&Solve*.

Na análise de tensões interessa-se pelos valores máximos de solicitação da casca na mesma modulação em que foi subdividida a estrutura a ser gerada na segunda etapa. Para a torre de 140 metros, foram definidos módulos de 10 metros de altura no eixo vertical, o que consequentemente gerou uma subdivisão da casca em 14 partes (Fig. 3.31). O módulo 1 é o situado na parte mais alta da torre e o módulo 14 junto à base da torre.

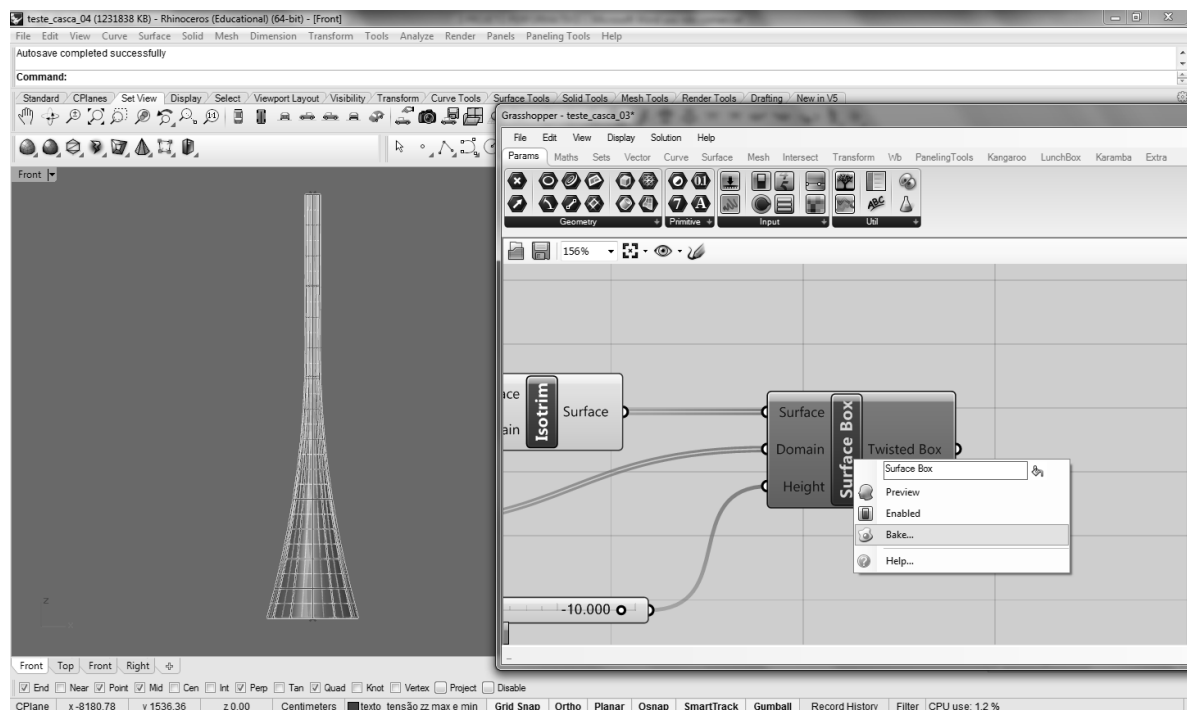
Figura 3.31 - Subdivisão da superfície



Fonte: desenvolvido pela autora

Para gerar o modelo tridimensional que será submetido à análise devem-se definir todos os parâmetros de geometria, tais como os raios dos círculos e a espessura da casca. Após ser feita essa definição, a geometria foi “congelada” através do comando *bake* do *Grasshopper* (Fig. 3.32). Este “congelamento” transforma a geometria virtual criada pelo algoritmo em modelo tridimensional no *Rhinoceros*. Esse procedimento permite que o modelo sofra a simulação física dentro do próprio *Rhinoceros* pelo *Scan&Solve*, atendendo assim o critério da interoperabilidade necessário ao bom funcionamento dos modelos performativos.

Figura 3.32 - Transformação da geometria em modelo tridimensional



Fonte: desenvolvido pela autora

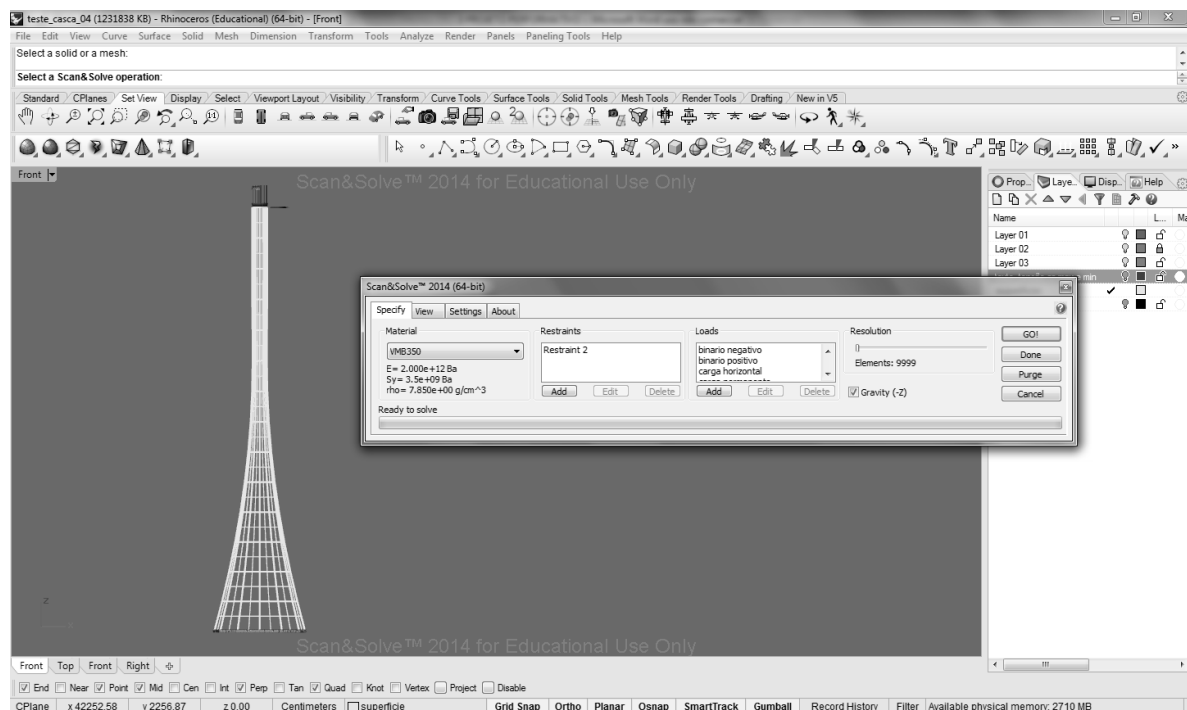
Essa forma pode ser transformada em modelo tridimensional quantas vezes forem necessárias. A cada novo teste de geometria, os parâmetros podem ser modificados no *Grasshopper* e quando estiverem dispostos de modo satisfatório, transformados em um novo modelo tridimensional para ser submetido à análise de tensões.

3.3.1.2 Análise estrutural da casca

No *Scan&Solve* foram definidas as propriedades do material, no caso do aço VMB-350, e aplicados os carregamentos definidos anteriormente. As cargas foram aplicadas no topo da torre de acordo com as definições explicadas no item 3.2.2 (ver tabela 3.3).

O *Scan&Solve* funciona dentro do *Rhinoceros*, o que permite que as formas definidas no *Grasshopper* tenham sua análise estrutural feita de forma iterativa. Sua interface é bastante simplificada, não exigindo do usuário um grande conhecimento de análise estrutural. É necessário apenas definir as propriedades do material, as condições de contorno, os carregamentos e a resolução da malha, como pode-se ver na Fig. 3.33.

Figura 3.33 - Aplicação de carregamentos através do Scan&Solve



Fonte: desenvolvido pela autora

Para encontrar as espessuras máximas equivalentes em cada módulo da casca representativa da torre foi necessário adotar para a análise uma espessura de referência, tomada com valor igual a 10 cm. Através da tensão máxima solicitante de cada módulo (σ_{sd}), foi obtida uma espessura equivalente para o desenvolvimento da treliça por meio da expressão:

$$t = \frac{\sigma}{f_{yd}} \times 10 \text{ cm} \quad (3.9)$$

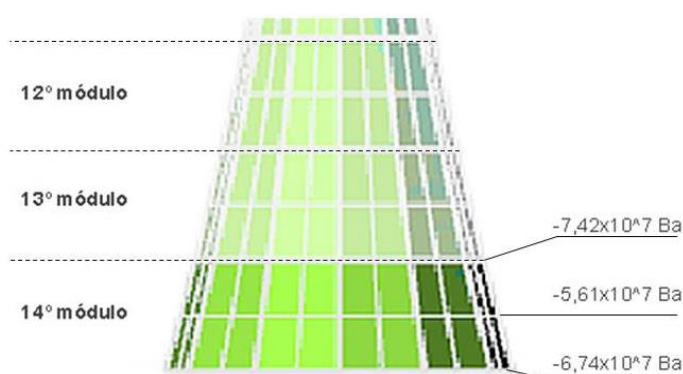
Sendo assim, foi possível encontrar a área do anel em cada módulo e converter essa área em uma equivalência de quantidade de tubos equivalente, o que será visto mais detalhadamente a seguir.

Para a análise de tensões, o *Scan&Solve* permite um refinamento da malha com variação de 9999 a 500000 elementos. Como descrito anteriormente, os melhores resultados

encontrados foram os obtidos nas malhas com valores intermediários. Para a espessura de 10 cm foram feitas 4 análises: a primeira com o valor inicial de 9999 elementos (Apêndice A), as seguintes com os valores intermediários de 157000 elementos (Apêndice B) e 201100 elementos (Apêndice C), e a última com o máximo de refinamento permitido, ou seja, com 500000 elementos (Apêndice D).

Os resultados encontrados para cada análise de tensão estão na unidade padrão do *Scan&Solve* que é o Ba (barye). Para a conversão de unidades, deve-se lembrar que $1,0 \times 10^8$ Ba é equivalente a 10 MPa (megapascal), que será a unidade adotada para utilização na equação 3.9. A dificuldade em se alterar as unidades do programa foi a princípio um dificultador do processo, pois as unidades de entrada e saída dos valores também são diferentes entre si. Mas, com a familiarização do uso, ficou estabelecido que as unidades de entrada fossem Newtons para os carregamentos, e Ba para as propriedades mecânicas do material. Para se obter os resultados de tensão em cada módulo, foram retiradas as tensões da base, do ponto médio e da extremidade superior de cada módulo (Fig. 3.34).

Figura 3.34 – Tensões em cada módulo



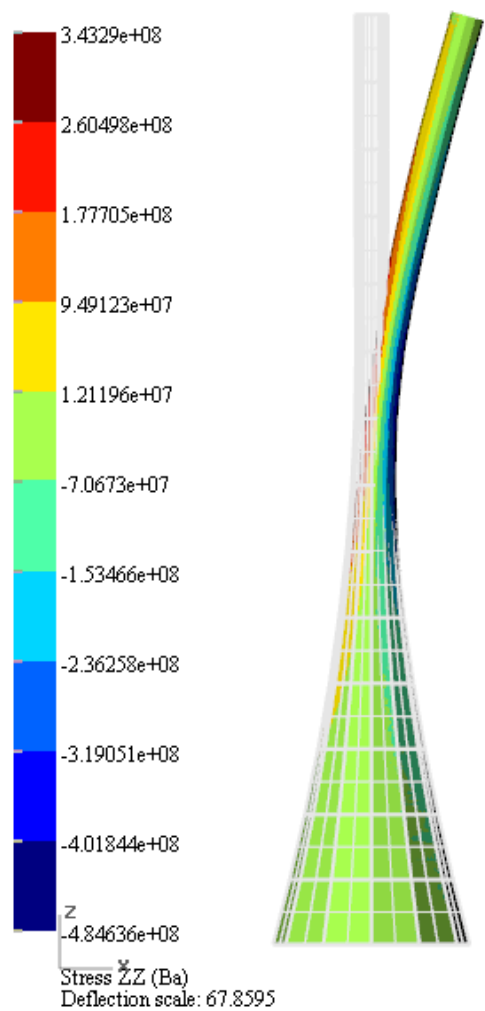
Fonte: dados da pesquisa

Os resultados esperados para a localização da tensão máxima da casca seria entre o 7º e o 6º módulo, no encontro entre a geometria de suporte das pás e a base da torre. Os resultados mais precisos com relação a esse critério estão nas malhas intermediárias, em que as tensões máximas foram localizadas exatamente nesse ponto. Quanto a análise quantitativa desse valor de tensão máxima, os resultados das malhas médias foram bem próximos, sendo o valor de $4,83 \times 10^8$ Ba para a malha de 157000 elementos e $4,84 \times 10^8$ Ba para a malha de

201100 elementos. Comparando as outras tensões máximas em cada módulo, foi adotada a malha de 201100 por ter valores mais elevados com relação aos da malha de 157000 elementos.

Sendo assim, a casca selecionada para servir de referência para a geração da treliça foi a com espessura de 10 cm, base de diâmetro de 30m, analisada com malha de 201100 elementos (Fig. 3.35). Após a obtenção das tensões máximas em MPa em cada módulo, aplicando-se a equação 3.9, foram encontradas as espessuras equivalentes apresentadas na Tabela 3.4.

Figura 3.35 - Tensões em ZZ para malha com 201100 elementos



Fonte: dados da pesquisa

Tabela 3.4- Relação entre tensão máxima e espessura necessária em cada módulo

Módulo	Tensão máxima solicitante de cálculo (Ba)	Tensão máxima solicitante de cálculo (MPa)	Espessura necessária (cm)
1	-839000000	-8,39	0,330
2	-1850000000	-18,5	0,727
3	-2410000000	-24,1	0,947
4	-3400000000	-34	1,336
5	-4270000000	-42,7	1,677
6	-4840000000	-48,4	1,901
7	-4840000000	-48,4	1,901
8	-3600000000	-36	1,414
9	-2590000000	-25,9	1,017
10	-1840000000	-18,4	0,723
11	-1380000000	-13,8	0,542
12	-1130000000	-11,3	0,444
13	-784000000	-7,84	0,308
14	-742000000	-7,42	0,343

Fonte: dados da pesquisa

Com os resultados das espessuras em cada módulo da torre, pode-se dar início à segunda etapa de desenvolvimento da concepção da torre, pois a relação entre a espessura necessária e a quantidade de tubos em cada módulo já está estabelecida. Assim, ficam bem estabelecidas as condições de se encontrar as quantidades de tubos e gerar uma estrutura treliçada que alie estética ao um estado próximo do ótimo com relação à análise de tensões.

3.3.2 Segunda etapa

A segunda etapa de desenvolvimento do projeto da torre consistiu em analisar os dados de espessura da casca e relacioná-los com a quantidade de tubos equivalente em cada módulo da torre.

A quantidade de tubos a serem utilizados em cada módulo foi restringida entre 4 e 12. A área da base em cada módulo serviu como referência para a quantidade de tubos necessária de acordo com a análise de tensões.

Sendo assim, através do *Grasshopper*, foi desenvolvido um algoritmo para o desenvolvimento da treliça composta por perfis tubulares que relacionasse a casca com a quantidade de tubos necessária para compor a forma final da torre.

3.3.2.1 Análise quantitativa: escolha dos perfis e quantidade de tubos

O catálogo comercial de seções tubulares circulares da Vallourec do Brasil (2014) tem tubos com diâmetro externo variando de 33,4 mm a 355,6 mm. Para cada um dos diâmetros, existem várias opções de espessura. Como critério de seleção, a análise iniciou-se do maior tubo e da maior espessura atribuída a ele. Calculando a área da casca equivalente para cada módulo, obtém-se o resultado apresentado na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Cálculo da quantidade de tubos necessária em cada módulo para Ø 355,6 mm e t=25mm

Módulo	Ø seção inferior da casca (cm)	Área da seção inferior da casca (cm ²)	Quantidade de tubos necessária para Ø 355,6 mm e t=25mm
1	500,00	517,13	2
2	500,00	1139,37	4
3	500,00	1483,61	6
4	500,00	2091,43	8
5	500,00	2624,79	10
6	500,00	2973,84	11
7	630,00	3749,99	14
8	760,00	3368,71	13
9	990,00	3159,69	12
10	1270,00	2880,92	11
11	1580,00	2688,71	10
12	2000,00	2787,20	11
13	2500,00	2417,46	9
14	3000,00	3234,00	12

Fonte: dados da pesquisa

A área da seção inferior da casca foi obtida através das espessuras encontradas (Tab. 3.5) e calculada através da fórmula da área do anel (3.10):

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (3.10)$$

onde:

D é o diâmetro externo e,

d o diâmetro interno de cada módulo da casca, dado por

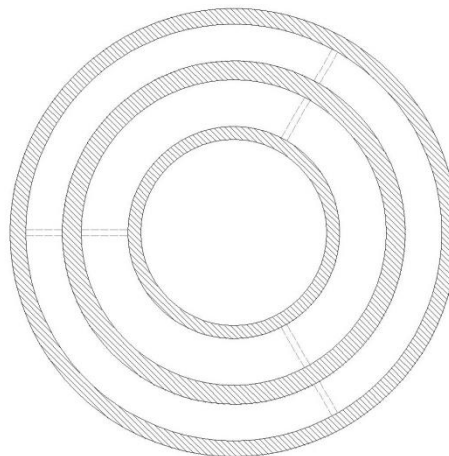
$$d = D - 2e \quad (3.11)$$

onde **e** é a espessura obtida para cada módulo através do cálculo das tensões máximas.

Portanto, percebe-se através da tabela que no módulo 8 da torre, seriam necessários 13 tubos para atender as solicitações à treliça. Desta maneira considerou-se a utilização de combinar tubos, colocando mais de um perfil dentro do perfil maior, obtendo assim maior liberdade para o design da torre.

A combinação de tubos é uma possibilidade ainda em processo experimental. Estudos de combinações de até 3 perfis vêm sendo desenvolvidos para possibilitar o aproveitamento interno dos perfis (Fig. 3.36), aumentando a área da seção transversal das barras e, conseqüentemente, sua resistência às solicitações. Dessa maneira, é possível que a estrutura fique mais esbelta, com o uso aparente de perfis de menor seção.

Figura 3.36 – Exemplo de seção transversal de combinação de 3 tubos de Ø externo de 355,6 mm, 273 mm e 168,3 mm



Fonte: desenvolvido pela autora

Com a possibilidade de até 3 tubos sendo combinados, foram escolhidos primeiramente os tubos com maior espessura da tabela, e respectivamente as maiores espessuras de cada um. Utilizando a Eq. (3.10) verificou-se as combinações viáveis.

Tabela 3.6 – Cálculo de diâmetro interno dos tubos com a maior espessura

Ø Externo do tubo (mm)	Maior espessura t (mm)	Ø Interno do tubo (mm)
355,6	25	305,6
323,8	25	311
273	30	260,20
219,1	25	206,30
168,3	20	158,30

Fonte: VALLOUREC TUBOS DO BRASIL(2014)

Para a combinação dos tubos, a condição necessária é que o diâmetro interno do tubo de fora seja maior do que o diâmetro externo do tubo de dentro. Logo, vê-se que os tubos que atendem a esta condição são os de diâmetro 335,6 mm, 273 mm, 219,1mm e 168,3 mm, podendo haver as seguintes combinações entre eles mostradas na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Combinação de tubos e quantidade necessária para cada módulo

Módulo	Ø 355,6+Ø 168,3	Ø 355,6+Ø 219,1	Ø 355,6+Ø273	Ø 355,6+Ø273+Ø168,3
1	1	1	1	1
2	3	3	2	2
3	4	4	3	3
4	6	5	4	4
5	7	6	5	5
6	8	7	6	5
7	11	9	8	6
8	10	8	7	6
9	9	8	6	5
10	8	7	6	5
11	8	7	5	5
12	8	7	6	5
13	7	6	5	4
14	9	8	7	6

Fonte: dados da pesquisa

O cálculo da quantidade de tubos foi feito de acordo com a seguinte expressão:

$$N = \frac{A_c}{\sum A_t} \quad (3.12)$$

onde:

N é a quantidade de tubos equivalente;

A_c é a área da seção de cada módulo da casca;

A_t é a área da seção transversal de cada tubo;

Pelo catálogo da Vallourec (2014), os tubos utilizados têm as seguintes seções transversais indicadas na tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Área da seção transversal dos tubos selecionados

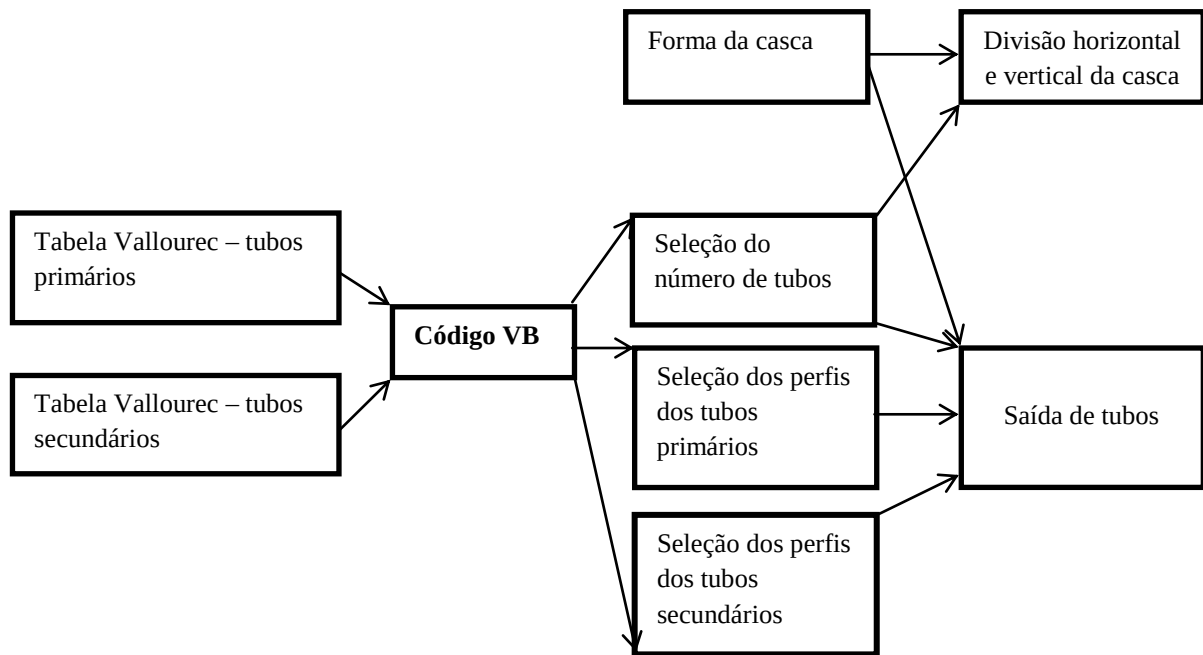
Ø Externo do tubo (mm)	Maior espessura t (mm)	Área da seção transversal (cm²)
355,6	25	260
273	30	229
219,1	25	152
168,3	20	93,2

Fonte: VALLOUREC TUBOS DO BRASIL(2014)

3.3.2.2 Desenvolvimento do algoritmo gerador da estrutura

Com estas definições, foi possível o desenvolvimento do algoritmo gerador da treliça através do *Grasshoper*. O algoritmo foi estruturado combinando as definições da geometria da casca concebida na primeira etapa do projeto com os dados de perfis tubulares da tabela da Vallourec com as espessuras encontradas para cada módulo através da análise de tensões. A tabela de tubos foi dividida em tubos primários e tubos secundários possibilitando a utilização de 2 tipos de perfis diferentes no design da torre. No diagrama 3.1 é possível compreender melhor o raciocínio para a combinação das definições e, como estes parâmetros irão ser convertidos na estrutura:

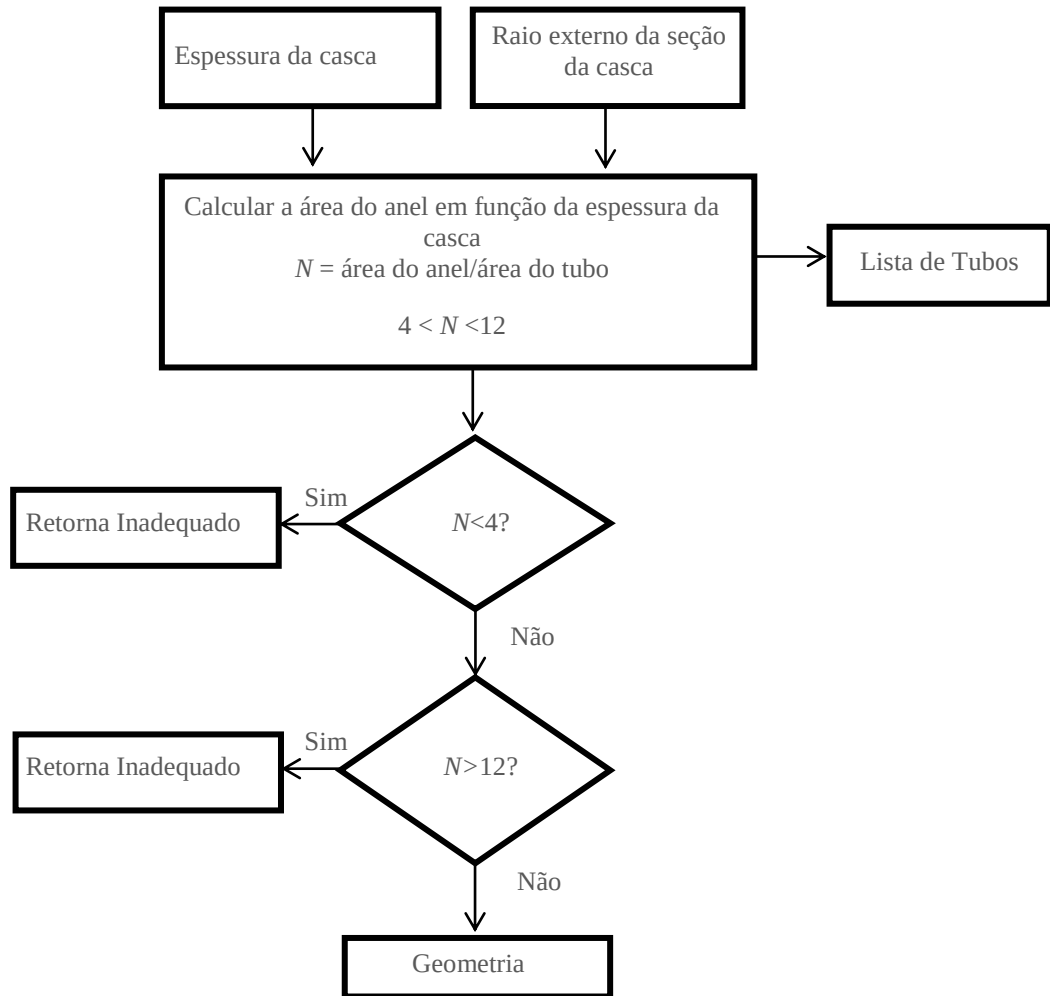
Diagrama 3.1 – Esquema de montagem do algoritmo para estrutura



Fonte: desenvolvido pela autora

As tabelas dos tubos selecionados se conectam diretamente ao código VB como parâmetro de entrada para as definições de condicionais. Além das tabelas, também são parâmetros de entrada a espessura da casca e o raio externo da seção. Como parâmetro de saída, os valores encontrados são classificados de forma booleana em adequados e não adequados conforme diagrama 3.2:

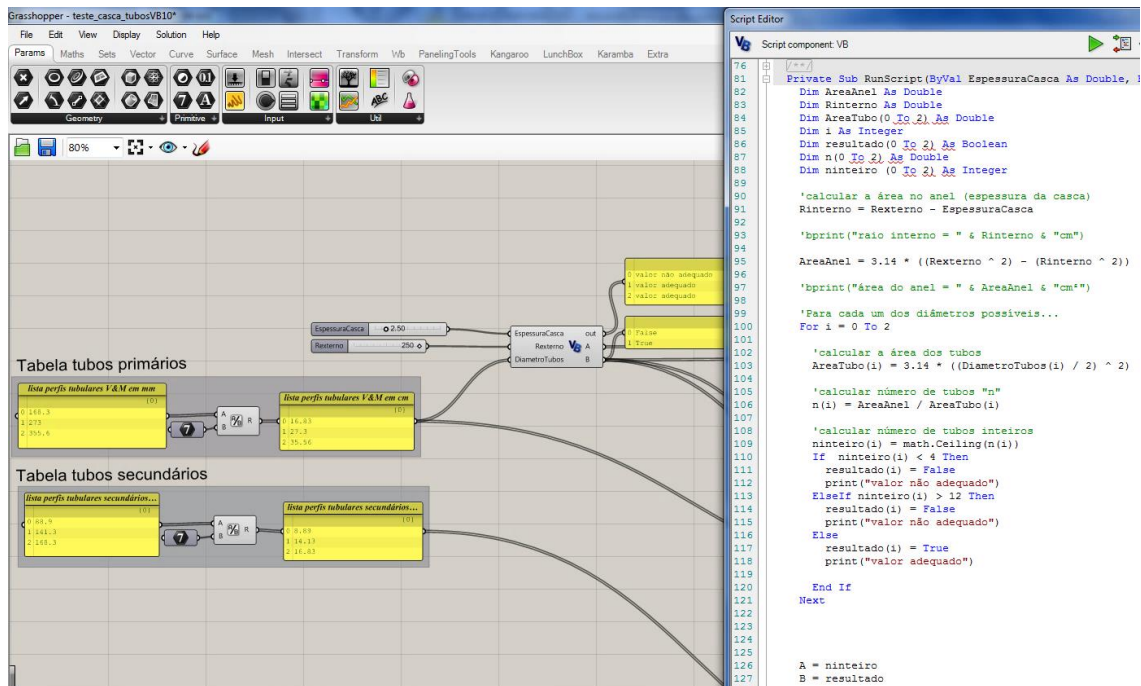
Diagrama 3.2 - Condicional para geração geométrica de tubos



Fonte: desenvolvido pela autora

O código VB é um código textual inserido dentro do *Grasshoper*, onde foi possível programar condicionais que se associam com as tabelas de tubos (Fig. 3.37). Dessa maneira, a espessura da casca ficou totalmente vinculada aos tubos que serão gerados na treliça. A alteração da espessura da casca gera automaticamente a alteração da quantidade de tubos, sua distribuição ao longo da modulação horizontal, e dos diâmetros de perfis primários e secundários.

Figura 3.37 – Parâmetros de entrada e saída no código VB



Fonte: desenvolvido pela autora

Após selecionar os valores adequados, o código também seleciona a menor quantidade de tubos de saída dentre os valores possíveis. Além de definir a quantidade, o código também a relaciona com os diâmetros viáveis, e destes a seleção é inversa, pois se considera o tubo com maior diâmetro (Fig. 3.38). Os tubos secundários, neste caso, têm uma relação de terem seu diâmetro equivalente ao perfil comercial mais próximo da metade do diâmetro do perfil primário. Essa relação também pode ser alterada ao longo do processo, sem criar interferência na saída dos tubos primários.

Número de tubos

Seleção dos tubos primários

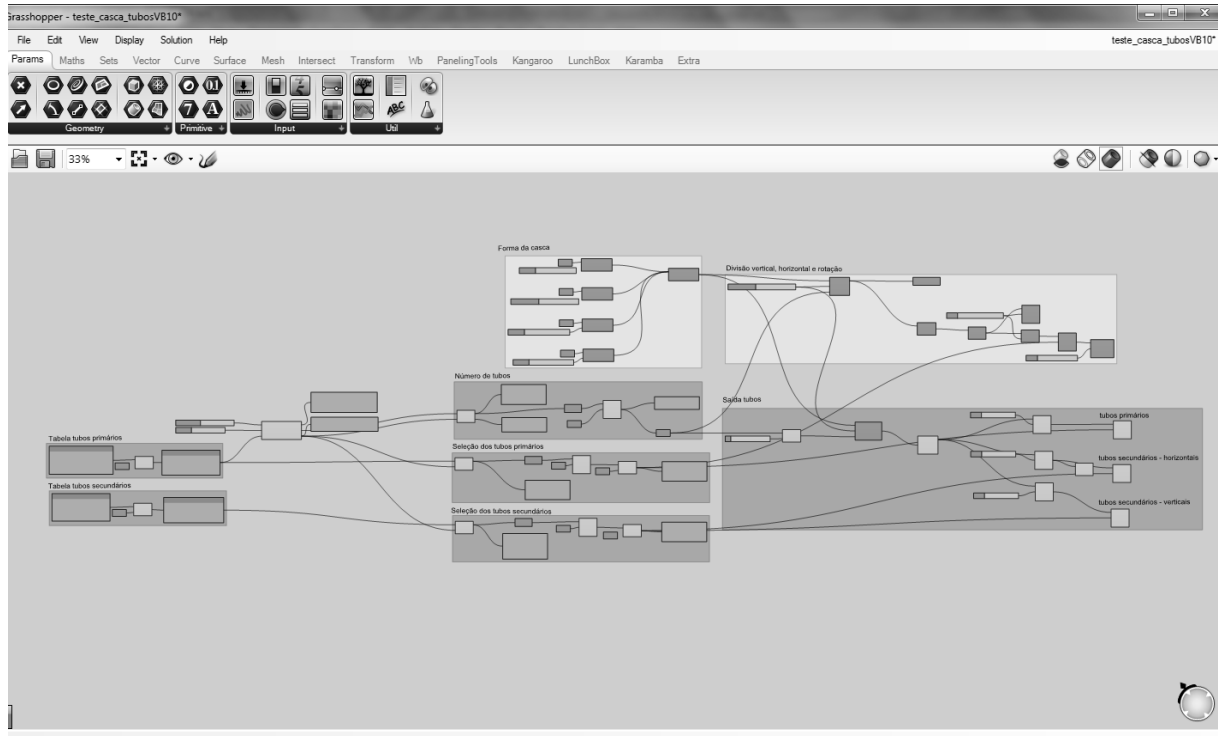
Seleção dos tubos secundários

Essa parte do algoritmo para seleção de tubos está diretamente conectada à programação de saída e à que define a modulação vertical, horizontal e o ângulo de rotação das barras da treliça em cada módulo. Essa parte da modulação se conecta ao algoritmo da primeira etapa, onde foi definida a forma da casca. Dessa maneira, a forma da treliça fica diretamente associada à forma da casca (Fig. 3.39).

A saída dos tubos está diretamente conectada com os parâmetros de divisão da modulação e aos diâmetros dos tubos comerciais definidos através da condicional do código VB. As saídas foram divididas em tubos primários, que são os de maior diâmetro; tubos secundários horizontais, que formam o travamento da treliça em cada início e fim do módulo; e, os tubos secundários verticais, que são responsáveis pelo travamento dos tubos primários no sentido contrário (Fig. 3.40).

Todos os parâmetros contidos no algoritmo (Fig. 3.41) são facilmente modificáveis, permitindo que sejam geradas inúmeras possibilidades para a torre. Podem ser alterados desde a geometria, modificando parâmetros de altura, diâmetro e espessura da casca, como os tubos contidos na lista, acrescentando ou retirando valores.

Figura 3.41 – Algoritmo completo da estrutura desenvolvido no *Grasshopper*

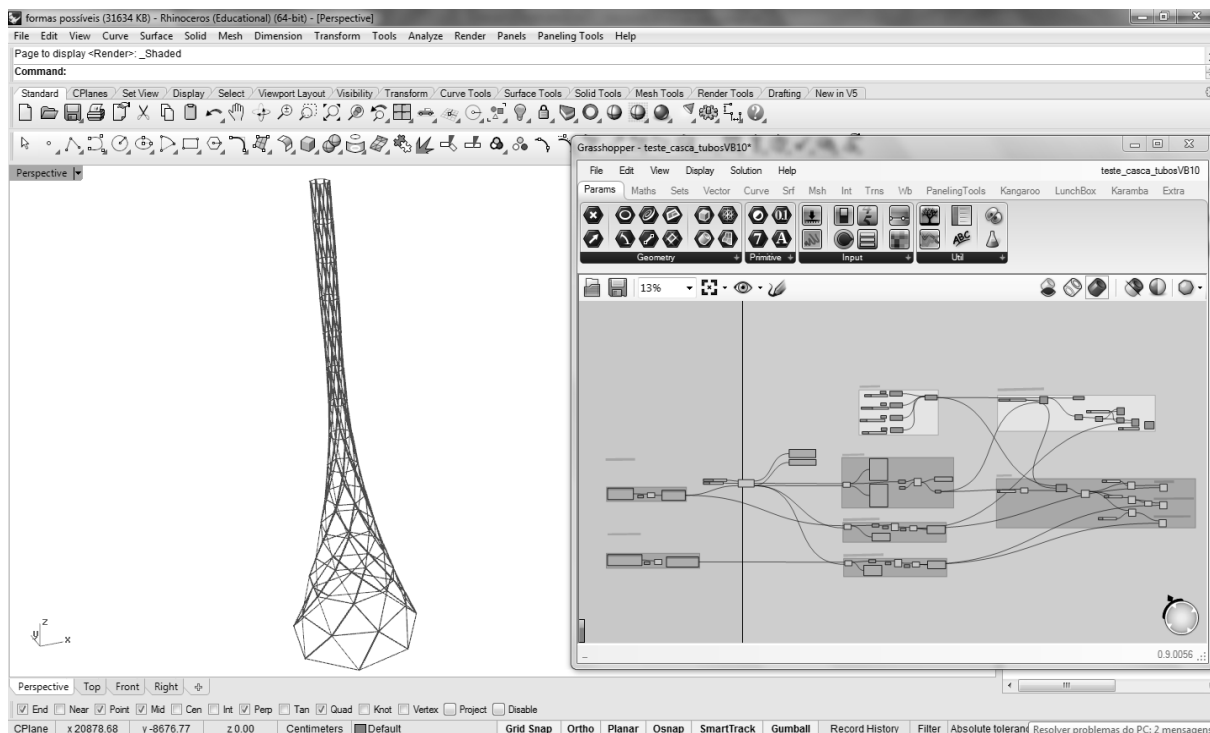


Fonte: desenvolvido pela autora

Para o teste da torre foram aplicados diversos valores de espessura de casca a fim de se obter treliças que atendessem a quantidade de tubos correspondente. Na Fig. 3.42 pode-se ver o modelo desenvolvido no *Grasshopper* e a saída em forma de geometria no *Rhinoceros*.

Como citado anteriormente na primeira etapa do trabalho, o algoritmo pode gerar quantos modelos forem necessários. Quando os parâmetros são escolhidos, ele pode ser transformado em modelo tridimensional para o *Rhinoceros*, onde poderá ser feita sua análise de tensões através do *Scan&Solve*, ser exportado para outros programas para documentação ou para impressão 3D em máquinas de fabricação digital.

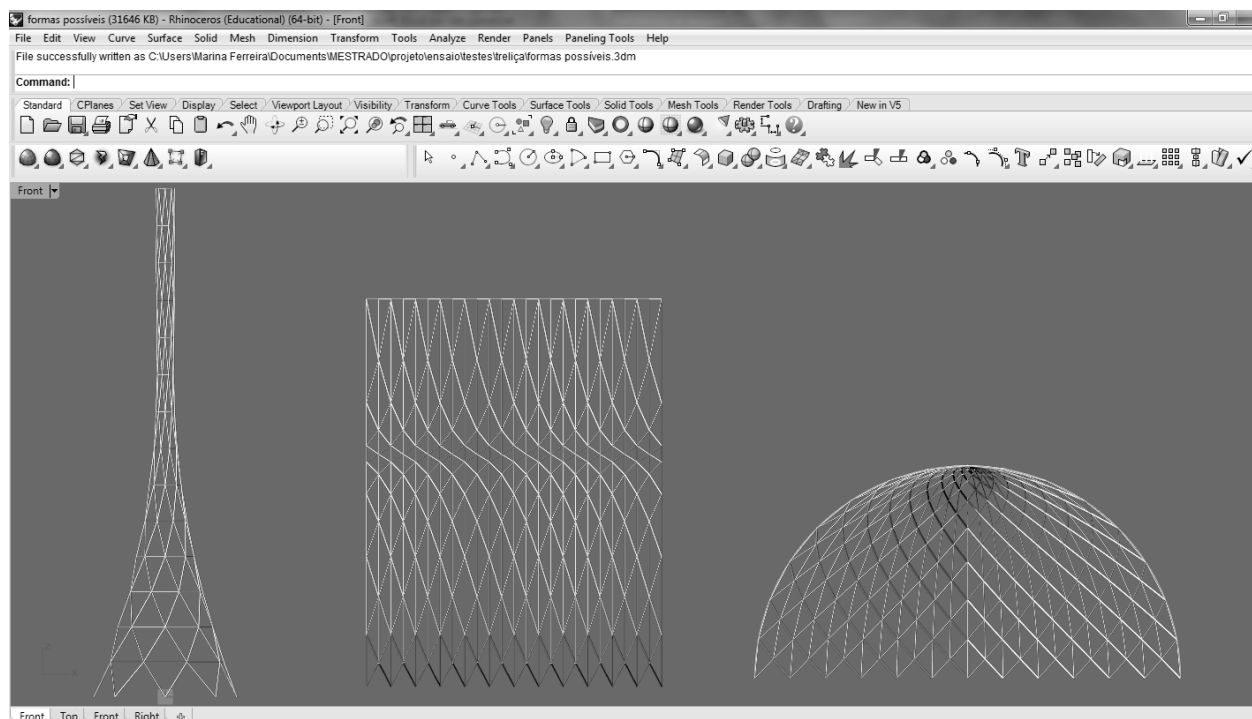
Figura 3.42 – Modelo no *Grasshopper* e saída da geometria no *Rhinoceros*



Fonte: desenvolvido pela autora

Esse modelo criado também pode ser aplicado para qualquer outra forma, uma vez que pode ser reconectado a outros padrões de casca; a geração da treliça plana também estará condicionada à espessura e aos tubos comerciais selecionados para tal. Na Fig. 3.43 pode-se ver a aplicação do padrão desenvolvido para a torre e sua aplicação para outras formas de superfície livre. Percebe-se que o padrão se adapta às superfícies sem perder as características dos parâmetros criados. Em cada casca, foram escolhidas diferentes espessuras e modulações para demonstrar as infinitas possibilidades de criação de treliças com o algoritmo desenvolvido.

Figura 3.43 – Aplicações do algoritmo desenvolvido a diversas formas

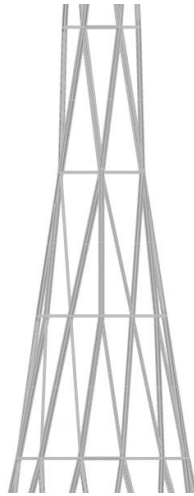


Fonte: desenvolvido pela autora

3.3.2.3 Análise de possibilidades formais da estrutura

Fazendo as combinações possíveis com quantidades de tubos de 4 a 12, consegue-se obter diversas opções de configuração para treliça, considerando também a possibilidade de se variar a quantidade de tubos ao longo da torre, desde que a quantidade de tubos menores seja equivalente à metade da quantidade de tubos maiores, para que as ligações coincidam como na Fig. 3.44.

Figura 3.44 – Transição proposta para soluções com variação de quantidades de tubos



Fonte: desenvolvido pela autora

Também foi considerada a possibilidade do tubo não variar a angulação a cada dois módulos. Para o último caso foi previsto o cálculo da quantidade de tubos aumentando em função do cosseno do ângulo através da seguinte expressão:

$$h = \frac{\pi r}{N} \cos \alpha \quad (3.13)$$

onde:

h é a altura do módulo equivalente a 10 m;

r é o raio do círculo do módulo;

N é o número de tubos;

α é o ângulo de inclinação dos tubos.

Após encontrar o valor do cosseno, é verificado se a quantidade de tubos atende à condição proposta. Esteticamente, a solução fica de acordo com a Fig. 3.45:

Figura 3.45 – Tubos com módulos duplos



Fonte: desenvolvido pela autora

Fazendo as relações de área da casca com os tubos combinados, encontra-se a quantidade ideal de tubos em cada possibilidade. Como critério de seleção, ficou-se convencionado que a escolha seria sempre feita de tal forma a privilegiar os seguintes princípios:

- evitar ao máximo a situação de tubo dentro do tubo, principalmente a combinação que envolva três perfis;
- manter ao máximo a continuidade do mesmo perfil ao longo da torre;
- evitar módulos duplos, de modo a se ter uma malha formada por triângulos, caracterizando uma treliça;

a) Combinação de 8 e 4 tubos

Seguindo esses princípios, para a combinação de 4 e 8 tubos tem-se as combinações de perfis dadas na tabela 3.9, privilegiando sempre a possibilidade com menores combinações de tubos, ou menor peso dos perfis.

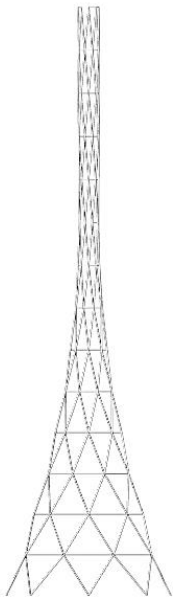
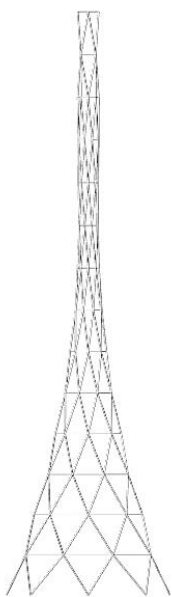
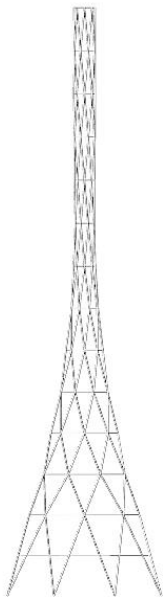
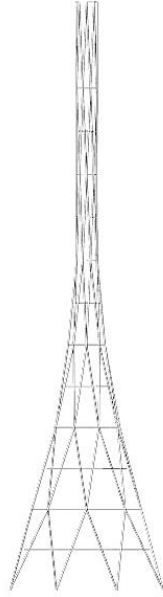
Tabela 3.9 – Relação área com quantidade de perfis – combinação de 8 e 4 tubos

Módulo	Ø 355,6	Ø 355,6+Ø168,3	Ø 355,6+Ø219,1	Ø 355,6+Ø273	Ø 355,6+Ø273+Ø168,3
1	2	1	1	1	1
2	4	3	3	2	2
3	6	4	4	3	3
4	8	6	5	4	4
5	10	7	6	5	5
6	11	8	7	6	5
7	14	11	9	8	6
8	13	10	8	7	6
9	12	9	8	6	5
10	11	8	7	6	5
11	10	8	7	5	5
12	11	8	7	6	5
13	9	7	6	5	4
14	12	9	8	7	6

	8 tubos
	4 tubos

Geometricamente, pode-se ter 4 tubos nos módulos 1 e 2, e o restante dos módulos podem ter 8 tubos, sem a necessidade de combinar 3 perfis. No quadro 3.2 exemplificam-se algumas possibilidades geométricas que atenderiam aos critérios determinados:

Quadro 3.2 - Algumas variações de geometrias possíveis com 4 e 8 tubos

Combinação 1	Combinação 2	Combinação 3	Combinação 4
Nº tubos = 8 Nº de módulos = 14 Módulos duplos = não	Nº tubos = 8 e 4 (módulos 1 e 2) Nº de módulos = 14 Módulos duplos = não	Nº tubos = 8 Nº de módulos = 14 Módulos duplos = sim (13 e 14)	Nº tubos = 8 Nº de módulos = 14 Módulos duplos = sim (todos)
			

Fonte: desenvolvido pela autora

b) Combinação de 10 e 5 tubos

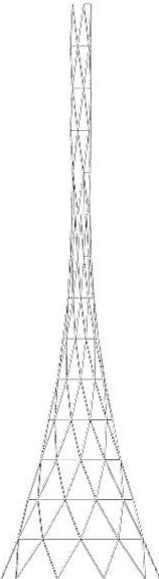
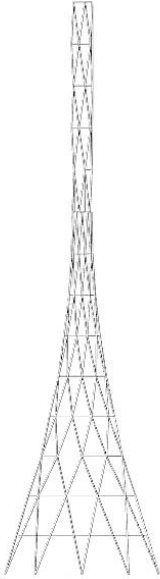
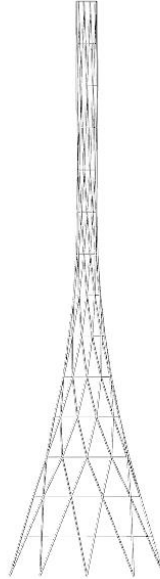
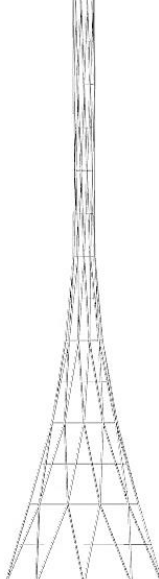
A próxima combinação foi feita com 10 e 5 tubos. Há a possibilidade de desenvolver a torre com 10 tubos, mas do módulo 1 ao 4, seria excessivo manter essa configuração. Dessa maneira, evitando a combinação de 3 perfis, seria interessante utilizar 5 perfis a partir do quinto módulo.

Tabela 3.10 – Relação área com quantidade de perfis – combinação de 10 e 5 tubos

Módulo	Ø 355,6	Ø 355,6+Ø168,3	Ø 355,6+Ø219,1	Ø 355,6+Ø273	Ø 355,6+Ø273+Ø 168,3
1	2	1	1	1	1
2	4	3	3	2	2
3	6	4	4	3	3
4	8	6	5	4	4
5	10	7	6	5	5
6	11	8	7	6	5
7	14	11	9	8	6
8	13	10	8	7	6
9	12	9	8	6	5
10	11	8	7	6	5
11	10	8	7	5	5
12	11	8	7	6	5
13	9	7	6	5	4
14	12	9	8	7	6

	10 tubos
	5 tubos

Quadro 3.3 - Algumas variações de geometrias possíveis com 10 e 5 tubos

Combinação 1	Combinação 2	Combinação 3	Combinação 4
Nº tubos = 10 e 5 (módulos 1 a 5) Nº de módulos = 14 Módulos duplos = não	Nº tubos = 10 e 5 (módulos 1 a 5) Nº de módulos = 14 Módulos duplos = sim (13 e 14)	Nº tubos = 10 Nº de módulos = 14 Módulos duplos = sim (1 a 4; 13 e 14)	Nº tubos = 10 Nº de módulos = 14 Módulos duplos = sim (todos)
			

c) Combinação de 12 e 6 tubos

Com 12 e 6 tubos, é possível que haja geometrias somente com 12 ou somente com 6 tubos. Utilizando 12 tubos, é possível que quase toda a torre seja feita sem a necessidade de colocar tubo dentro do tubo (exceto nos módulos 7 e 8). Do primeiro ao sexto módulo, o ideal é que se utilize somente 6 tubos. A torre inteira com 6 tubos é possível, mas exige que em quase todos os módulos se tenham 3 perfis.

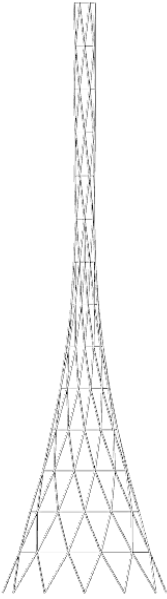
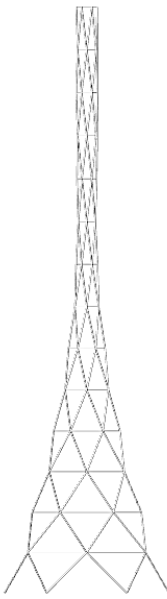
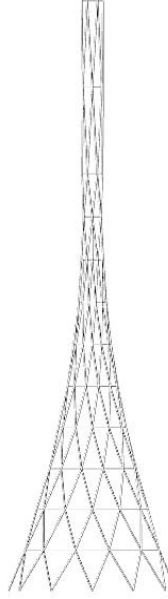
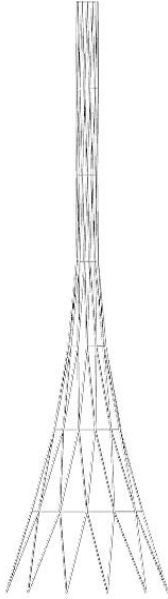
Tabela 3.11 – Relação área com quantidade de perfis – combinação de 12 e 6 tubos

Módulo	Ø 355,6	Ø 355,6+Ø168,3	Ø 355,6+Ø219,1	Ø 355,6+Ø273	Ø 355,6+Ø273+Ø168,3
1	2	1	1	1	1
2	4	3	3	2	2
3	6	4	4	3	3
4	8	6	5	4	4
5	10	7	6	5	5
6	11	8	7	6	5
7	14	11	9	8	6
8	13	10	8	7	6
9	12	9	8	6	5
10	11	8	7	6	5
11	10	8	7	5	5
12	11	8	7	6	5
13	9	7	6	5	4
14	12	9	8	7	6

	12 tubos
	6 tubos

Fonte: dados da pesquisa

Quadro 3.4 - Algumas variações de geometrias possíveis com 12 e 6 tubos

Combinação 1	Combinação 2	Combinação 3	Combinação 4
Nº tubos = 12 e 6 (módulos 1 a 6) Nº de módulos = 14 Módulos duplos = não	Nº tubos = 6 Nº de módulos = 14 Módulos duplos = não	Nº tubos = 12 e 6 (módulos 1 a 6) Nº de módulos = 14 Módulos duplos = sim (1 a 4)	Nº tubos = 12 Nº de módulos = 14 Módulos duplos = sim (todos)
			

Fonte: desenvolvido pela autora

d) Combinação de 7 tubos

A última possibilidade seria a torre com 7 tubos. Essa opção exige que o sétimo módulo tenha 3 tubos combinados. Além disto, existe uma grande variação de perfis ao longo da torre, o que faz com que esta não seja a opção mais aconselhável.

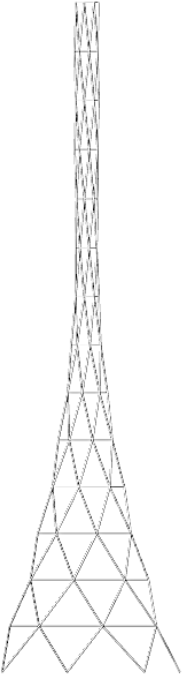
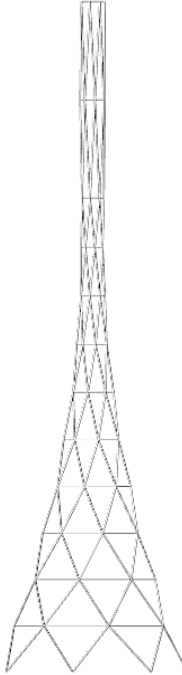
Tabela 3.12 – Relação área com quantidade de perfis – 7 tubos

Módulo	Ø 355,6	Ø 355,6+Ø168,3	Ø 355,6+Ø219,1	Ø 355,6+Ø273	Ø 355,6+Ø273+Ø168,3
1	2	1	1	1	1
2	4	3	3	2	2
3	6	4	4	3	3
4	8	6	5	4	4
5	10	7	6	5	5
6	11	8	7	6	5
7	14	11	9	8	6
8	13	10	8	7	6
9	12	9	8	6	5
10	11	8	7	6	5
11	10	8	7	5	5
12	11	8	7	6	5
13	9	7	6	5	4
14	12	9	8	7	6

7 tubos

Fonte: dados da pesquisa

Quadro 3.5 - Algumas variações de geometrias possíveis com 7 tubos

Combinação 1	Combinação 2
Nº tubos = 7	Nº tubos = 7
Nº de módulos = 14	Nº de módulos = 14
Módulos duplos = não	Módulos duplos = sim (1 a 4)
	

3.3.2.4 Critério de seleção

Analisando todas estas opções de combinações, foram descartadas primeiramente as que possuem módulos duplos por criarem formas de trapézio, que não contribuem para a eficiência estrutural, e esteticamente não têm um grande ganho com relação aos módulos simples. Para verificar comparativamente as combinações de tubos, na Tabela 3.13 são colocados os critérios de dispensa de 3 tubos e as menores variações de perfis ao longo dos módulos como determinantes para a decisão.

Tabela 3.13 – Critério de análise das combinações

Combinações de tubos	8	8_4	10	10_5	12	12_6	6	7
Necessidade de 3 tubos	não	não	não	sim	não	não	sim	sim
Variações de perfis ao longo dos módulos	6	6	8	11	3	6	6	7
Quantidade de módulos sem combinação de perfis	4	4	5	2	12	12	3	3

Fonte: dados da pesquisa

De imediato, descarta-se a combinação de 10 e 5 tubos e a torre com 6 e 7 tubos. Comparando as variações, a menor é para a torre com 12 tubos, mas esta cria um excesso de tubos nos módulos superiores. Para reduzir este excesso deve-se combinar com a quantidade de 6 tubos nos módulos de 1 a 3. A torre combinando 8 e 4 tubos, também tem seis variações ao longo da torre, tendo 8 tubos dos módulos 4 a 14, e 4 tubos nos módulos restantes. A geometria com somente 8 tubos também apresenta 6 variações, com a vantagem com relação à torre de 12 de possuir menos tubos em excesso no topo.

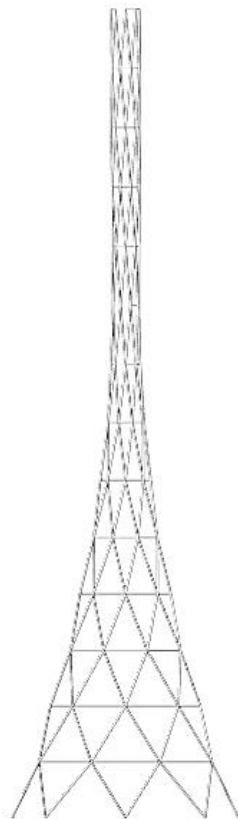
Tendo como critério a quantidade de módulos sem combinação de perfis, a melhor geometria seria a da torre com 12 e 6 tubos. Somente do ponto de vista quantitativo, esta seria a melhor geometria. Mas, esteticamente, a preferência seria pela continuidade da mesma quantidade de perfis com o menor número de tubos. Desta maneira, a torre com 8 tubos obtém o melhor resultado, embora não tenha muitos módulos com o perfil de Ø355,6mm.

Comparando o peso próprio da torre, somente com relação ao somatório dos tubos, a torre com 8 tubos teria um peso equivalente a 3424 quilonewtons. A torre com 12 e 6 tubos teria um peso maior, igual à 3594 quilonewtons.

3.3.3 Resultado

Desta maneira, a melhor geometria encontrada através desta metodologia, seria a com 8 tubos em todos os 14 módulos (Fig. 3.46), tendo os perfis primários o diâmetro de 355,6mm e os secundários de 168,3mm. Essa geometria mantém todos os módulos com o mesmo aspecto estético, o que garante uma unidade visual à estrutura. Além disto, todos os tubos se conectam no mesmo ponto, evitando variações de padrões para as ligações.

Figura 3.46 – Geometria selecionada para desenvolvimento do projeto



Fonte: desenvolvido pela autora

A variação dos perfis para que toda a torre tenha a mesma quantidade de 8 tubos primários em cada módulo seria, de maneira preliminar, conforme explicitado na tabela 3.14:

Tabela 3.14 – Variação dos perfis em cada módulo para torre com 8 tubos

Módulo	Perfil
1	Ø 355,6
2	Ø 355,6
3	Ø 355,6
4	Ø 355,6
5	Ø 355,6+Ø168,3
6	Ø 355,6+Ø168,3
7	Ø 355,6+Ø273
8	Ø 355,6+Ø219,1
9	Ø 355,6+Ø219,1
10	Ø 355,6+Ø168,3
11	Ø 355,6+Ø168,3
12	Ø 355,6+Ø168,3
13	Ø 355,6+Ø168,3
14	Ø 355,6+Ø219,1

Fonte: dados da pesquisa

Na Fig. 3.47 foi feita uma fotomontagem simulando como ficaria a torre com o aerogerador implantada em um terreno plano. A proposta inicial era criar uma estrutura esteticamente agradável, que não gerasse impacto visual negativo onde fosse implantada. A estrutura encontrada cumpre estes pré-requisitos propiciados por sua geometria desenvolvida através da aplicação do modelo performativo, além de ter tido sua eficiência estrutural comprovada ainda na etapa de estudo preliminar do projeto.

Figura 3.47 – Fotomontagem da torre em perspectiva com aerogerador



Fonte: desenvolvido pela autora

4

CONCLUSÃO

Nas décadas de 1960 e 1970 ocorreram as primeiras tentativas de se problematizar a arquitetura em meios digitais, onde o uso das ferramentas digitais ocorre como uma tentativa do uso do computador como um facilitador do processo de projeto. As primeiras experiências estavam atreladas às possibilidades de cálculo oferecidas, tendo sido, portanto uma demanda maior da engenharia de estruturas do que necessariamente da arquitetura. Mas, devido às dificuldades operacionais da época, o uso digital não foi massivamente incorporado, tendo sido amplamente utilizado como parte do processo representativo a partir dos anos 1990, tendo até os anos 2000 maior desenvolvimento em softwares de desenhos bidimensionais e perspectivas 3D foto-realísticas.

A partir dos anos 2000, o desenvolvimento de ferramentas paramétricas e algorítmicas aplicadas ao projeto de arquitetura propiciou uma maior integração das partes componíveis, visto que não é apenas uma técnica de representação bidimensional, mas uma tentativa de se representar e modificar o projeto tridimensionalmente. Nesse processo são utilizados algoritmos, que são aplicados para a composição de problemas e processados por análise combinatória para a geração de milhões de possibilidades. Com o auxílio dessa ferramenta, o arquiteto passa a ter inúmeras possibilidades que podem ser empregadas tanto em questões formais quanto em aspectos pragmáticos.

O projeto paramétrico e algorítmico tem potencial de viabilizar uma arquitetura onde o processo de criação do arquiteto está ligado ao gerenciamento de dados. O resultado final advém de um dos resultados possíveis dentro de uma infinidade de alternativas geradas, o que pode viabilizar uma abertura do processo de projeto para a colaboração de outros profissionais. A abertura do processo diminui as fronteiras entre projeto e construção, separação esta muito fortalecida pelo projeto representativo. Essa separação reflete uma

sociedade industrial centrada na divisão do trabalho e especialização do conhecimento. Na era digital-financeira o trabalho e as condições de circulação da informação e produção têm se modificado, o que impacta diretamente as redefinições das relações na construção civil.

O processo digital cria um fluxo contínuo de projeto e produção. Sendo assim, com a ampliação de possibilidades atreladas ao projeto e a abertura para a participação de outros profissionais na concepção da forma, cria-se a oportunidade de conceber projetos baseados em regras mais racionais e menos intuitivas. Portanto, os modelos baseados em desempenho passam a ser desenvolvidos, onde a prioridade do edifício é responder a alguns parâmetros prioritários, e a forma é uma consequência dessas respostas. O projeto baseado em desempenho pode ser baseado apenas na otimização da forma concebida pelo arquiteto, ou pode abarcar sua própria geração. Em ambos os casos, é fundamental que o processo seja colaborativo, com a participação do engenheiro de estruturas desde os estágios preliminares do projeto.

Como recorte metodológico para o estudo dos modelos baseados em desempenho, esse trabalho se propôs a abordar somente o desenvolvimento do projeto de estruturas. Numa abordagem contemporânea denominada por Oxman e Oxman (2010) como *Novo Estruturalismo*, foram estudadas maneiras de aplicação da reversão na maneira de se pensar a forma, partindo do material e dos parâmetros estruturais, e não o inverso. Através do estudo do trabalho que vêm sendo desenvolvido por diversos profissionais de arquitetura e engenharia na produção de edifícios icônicos desde o princípio dos anos 2000, buscou-se não estabelecer modelos, mas analisar denominadores comuns e possibilidades de se produzir projetos através de design generativo, estrutural e iterativo.

Como proposta de investigação de ordem experimental, propôs-se a concepção da estrutura de uma torre de energia eólica, com restrições geométricas e físicas específicas para o desenvolvimento do objeto. O objeto escolhido apresentava a complexidade estrutural necessária para a aplicação da metodologia de modelos baseados em desempenho com o aporte teórico proposto pelo *Novo Estruturalismo*.

A metodologia aplicada foi uma aproximação do modelo baseado em desempenho e acredita-se que tenda para o modelo generativo, tendo sempre a integração de desenvolvimento da geometria com a análise estrutural. Para a geração da forma da torre, foi proposto o desenvolvimento de um modelo paramétrico e algorítmico que tivesse a geração da estrutura atrelada aos resultados da análise estrutural. Para tanto, a concepção da torre foi dividida em duas etapas, onde na primeira foi realizada a análise de tensões da casca que

guiaria a geração da estrutura. Foram encontradas as tensões máximas em cada módulo, e a partir destes valores, foram estabelecidas as quantidades mínimas de tubos nas 14 subdivisões da casca. Através de tabelas, os dados numéricos foram associados a critérios qualitativos e estéticos, e dessa maneira chegou-se a melhor forma da estrutura para os parâmetros estabelecidos.

Essa metodologia buscou ainda na etapa de estudo preliminar da estrutura, encontrar uma forma que fosse eficiente esteticamente, estruturalmente e economicamente. A forma a ser avaliada numa próxima etapa de projeto já teve em sua concepção uma abordagem mais racional e menos intuitiva. Algumas dificuldades ao longo do processo foram encontradas, tais como o aprendizado das ferramentas paramétricas e programação algorítmica. Mas, uma vez criado o sistema foi possível vislumbrar a vantagem de se ter concebido não apenas um projeto, mas programado uma “máquina de soluções” baseada em parâmetros. Caso, a geometria ou as tabelas de tubos comerciais necessitem ser modificado, o projeto pode ser novamente gerado sem necessidade de retrabalho dos profissionais.

Para a análise estrutural, buscou-se um *plugin* para o software *Rhinoceros* que tivesse seu processo praticamente iterativo com a geração da forma através do *plugin Grasshoper*, e fosse simples o bastante para que um profissional sem ampla formação em análise por MEF pudesse utilizar. O *plugin* escolhido, o *Scan-and-Solve* foi bastante eficiente para análise da casca, mas por sua simplificação da análise, não obteve o mesmo desempenho satisfatório na análise da estrutura. Sendo assim, para uma nova etapa do trabalho seria necessário utilizar um *software* mais sofisticado de análise estrutural. Complementarmente, deveria se efetuar um dimensionamento mais preciso, calculando a capacidade resistente das barras seguindo rigorosamente as prescrições da norma brasileira ABNT NBR 16239:2013 e ainda avaliar a torre quanto à vibração e quanto à fadiga. Essas verificações poderiam levar a algumas alterações nas seções transversais dos tubos das barras, provocando um acréscimo total no peso obtido.

A metodologia apresentou um grande potencial para o desenvolvimento de estruturas complexas. Através de futuros trabalhos, poderiam ser avaliadas as possibilidades de se complexificar a análise estrutural, com a aplicação de ligações e análises de segunda ordem como parte do processo. Outras partes integrantes do projeto poderiam ser incorporadas através de um objeto mais complexo, como por exemplo, em uma cobertura, analisando a integração da estrutura com as peças de vidros, e como seria a correlação de mais de um

componente ao se gerar formas e avaliar o desempenho. Também poderia ser mais bem discutida a integração do projeto com a fabricação digital, e a integração do processo com fabricação e montagem. O estudo dos nós, sua produção, fabricação e montagem através de CAD/CAM também são fundamentais para o avanço da pesquisa. Além disto, os parâmetros de custos e tempo também poderiam ser incorporados aos processos de geração e fabricação da forma.

Mas, embora não se possa afirmar que o modelo baseado em desempenho melhore a qualidade do projeto desenvolvido, observa-se que ele aumenta substancialmente as soluções de projeto e melhora a eficiência da estrutura ainda no estudo preliminar. O processo colaborativo dilui as questões de autoria da forma, fazendo com que os conflitos entre autores (arquitetos) e avaliadores e materializadores (engenheiros), sejam diminuídos em prol de um melhor desempenho do projeto, através de processos investigativos e experimentais. Além disto, pode-se discutir a questão da influência da programação do software no desenvolvimento de projetos, como por exemplo, no caso do projeto do arquiteto Arata Isozaki para o Qatar National Convention Centre (2011). A forma acabou sendo o resultado de uma combinação de possibilidades de programação algorítmica do software com a intenção do arquiteto e a avaliação da estática do engenheiro civil.

A integração dos profissionais amplia o conhecimento tecnológico aplicado ao projeto, criando potenciais problemas para desenvolvimento da indústria da construção e tecnologia no país. Desenvolver projetos complexos vai além de se desenvolver questões estéticas aplicadas à forma, mas tornam-se motores econômicos mais amplos para responder às demandas sociais cada vez mais complexas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA. *Nosso Setor*. Disponível em < <http://www.portalabeeolica.org.br/> >. Acesso em: 27 de outubro de 2014.

ANDRADE, M, *Projeto Performativo na prática arquitetônica recente: Estrutura Conceitual*. Campinas: UNICAMP, 2012. Tese (Doutorado) Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2012.

ANDREA, Axel. *Seminário e treinamento Tecnologia de Energia Eólica*. UFMG, 15 e 16 de janeiro de 2014a. (Acesso Restrito)

ANDREA, Axel. *Condensed Version of Technical Report TR-04R0-2014-An: "Estimation of Tower Design Loads for a Generic 3MW Wind Turbine"*. Salvador, 27 de março de 2014b. (Acesso Restrito).

ARCHDAILY. *Canton Tower/Information Based Architecture*. 19 nov. 2010. Disponível em: <<http://www.archdaily.com/?p=89849>> Acessado em 08 de setembro de 2014.

ARCHDAILY. *Estádio Olímpico de Munique / Frei Otto & Gunther Behnisch*. 25 fev. 2012. Disponível em: < <http://www.archdaily.com.br/br/01-34759/estadio-olimpico-de-munique-frei-otto-e-gunther-behnisch> > Acessado em 20 de novembro de 2014.

ARUP. *2010: AAMI Park Stadium, Melbourne, Vic*. Disponível em: < <http://www.50.arup.com.au/2010> > Acessado em 20 de novembro de 2014.

ASSAN, A. R. *Método dos Elementos Finitos: primeiros passos*. 2ª ed. – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16239: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

AUGENBROE, G. *A framework for rational building performance dialogues*. In: KOLAREVIC, B. *Performative Architecture beyond instrumentality*. Nova Iorque: Spon Press, 2005. p. 99-109.

BALMOND, C. *Crossover*. Munique, Londres e Nova Iorque: Prestel Verlag, 2013.

BALTAZAR, Ana Paula. *Arquitetura e representação gráfica: considerações históricas e aspectos práticos*. V!RUS, São Carlos, n.8, dezembro 2012. Disponível em: <<http://www.nomads.usp.br/virus/virus08/?sec=4&item=1&lang=pt>> . Acesso em : 23 de janeiro de 2014.

BECHTHOLD, M. *Performatism or performance-based design?*. In: GROBMAN, Y, J; NEUMAN, E. (Ed.) *Performatism: Form and Performance in Digital Architecture*. Oxon: Routledge, 2012. p. 49-52.

BESSERUD, K.; KATZ, N.; BEGHINI, A. *Structural Emergence: Architectural and Structural Design Collaboration at SOM*. In: PETERS, B; KESTELIER, X. (Ed.) *Computation Works: the building of algorithmic thought*. Londres: Architectural Design, Mar.-Abr. 2013. p.48-55.

BLASSEL, J. *Engineering in a performative environment*. In: KOLAREVIC, B. *Performative Architecture beyond instrumentality*. Nova Iorque: Spon Press, 2005. p. 125-133.

BURRY, J.; BURRY, M. *The New Mathematics of Architecture*. Nova Iorque: Tames&Hudson, 2010

CALATRAVA. *Projects: Oriente Station*. Disponível em<
<http://www.calatrava.com/#/Selected%20works/Architecture/Lisbon?mode=english/>>
Acessado em 20 de novembro de 2014.

CANTON TOWER. *Design Inspiration*. Disponível em: <
<http://www.cantontower.com/en/about.aspx?code=0102>>. Acessado em 27 de outubro de 2014.

CELANI, G. *Algorithmic Sustainable Design. Uma visão crítica do projeto generativo. Resenhas Online*, São Paulo, ano 10, n. 116.03, Vitruvius, ago. 2011 Disponível em: < <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/resenhasonline/10.116/3995>>. Acessado em 10 de outubro de 2014.

CIRLOT, J. E. *Gaudí: uma introdução à sua arquitetura*. Barcelona: Ed. Triangle Postals, 2001.

CRESESB. *História da Energia Eólica e suas utilizações*. Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=tutorial_eolica >. Acessado em 21 de janeiro de 2014.

DIEZ, G. *Projeto Estrutural na Arquitetura*. Porto Alegre: Ed. Masquatro, 2012.

DIMCIC, M. *Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms*. Stuttgart: Stuttgart University, 2011. Tese (Doutorado), Institute of Building Structures and Structural Design, Stuttgart University, 2011.

DUNN, N. *Digital Fabrication in Architecture*. London: Laurence King Publishing Limited, 2012.

ENGSTRÖM *et al.* *Tall towers for large wind turbines*. Estocolmo: Elforsk (2010)

FAKURY, R. H. *Dimensionamento básico de elementos de estruturas de aço. Versão 3*. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

FIRMO, Célio. VM TUBES. *Arquitetura com Perfis Tubulares – Uma Nova Linguagem*. Artigo técnico disponível em <[http://www.vmtubes.com.br/vmbInternet/filesmng.nsf/VMB/Arquitetura%20com%20Perfis%20Tubulares.pdf/\\$File/Arquitetura%20com%20Perfis%20Tubulares.pdf](http://www.vmtubes.com.br/vmbInternet/filesmng.nsf/VMB/Arquitetura%20com%20Perfis%20Tubulares.pdf/$File/Arquitetura%20com%20Perfis%20Tubulares.pdf)>. Acesso em: 01 de outubro de 2013.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. *Um primeiro curso em Elementos Finitos*. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

FOSTER + PARTNERS. *Projects / 30 St Mary Axe London, UK 1997 - 2004*. Disponível em: < <http://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe/>>. Acessado em 27 de novembro de 2014.

FOUNDATION SHUKHOV TOWER. *Tower*. Disponível em: < <http://www.shukhov.org/tower.html>>. Acessado em 27 de outubro de 2014.

FREARSON, A. *Qatar Nacional Convention Centre by Arata Isozaki* Dezeen, 22 ago. 2013. Disponível em: < <http://www.dezeen.com/2013/08/22/qatar-national-convention-centre-by-arata-isozaki/>> Acessado em 13 de dezembro de 2014.

GOMES FILHO, J. *Gestalt do Objeto: Sistema de Leitura Visual da Forma*. Editora Escrituras, São Paulo, 2000.

GRASSHOPPER. *Grasshoper: algorithmic modeling for Rhino. Version 5.0*. New York: David Rutten, 2012. Disponível em: <<http://www.rhino3d.com/download/grasshopper/1.0/wip/rc>>. Acesso em fevereiro de 2013.

GROBMAN, Y. J. *The various dimensions of the concept of “performance” in architecture*. In: GROBMAN, Y, J; NEUMAN, E. (Ed.) *Performatism: Form and Performance in Digital Architecture*. Oxon: Routledge, 2012. p. 9-13

KESTELIER, X. *Recent Developments at Foster + Partners SpecialistModelling Group*. In: PETERS, B; KESTELIER, X. (Ed.) *Computation Works: the building of algorithmic thought*. Londres: Architectural Design, Mar.-Abr. 2013. p.22-27.

KNIPPERS, J. *From Model Thinking to Process Design*. In: PETERS, B; KESTELIER, X. (Ed.) *Computation Works: the building of algorithmic thought*. Londres: Architectural Design, Mar.-Abr. 2013. p.72-81.

KOBE PORT TOWER. *Kobe Port Tower*. Disponível em: < <http://www.kobe-meriken.or.jp/port-tower/>>. Acessado em 29 de outubro de 2014.

KOLAREVIC, B. *Architecture in the digital age: design and manufacturing*. Nova Iorque: Spon Press, 2003.

KOLAREVIC, B. *Performative Architecture beyond instrumentality*. Nova Iorque: Spon Press, 2005.

LEACH, N. *Parametrics Explained*. In: OOSTERHUIS, K. (Ed.) *Next Generation Building* Vol.1, No.1 September. Baltzer Science Publishers: 2014. p. 33–42

LEMOS, A. *Brian Eno, Peter Schmidt, and Cybernetics*, 2009. Disponível em < <http://andrelemos.info/com104/2009/10/cibernetica.html>>. Acesso em: 26 de janeiro de 2014.

MALKAWI, A. M. *Performance simulation: research and tools*. In: KOLAREVIC, B. *Performative Architecture beyond instrumentality*. Nova Iorque: Spon Press, 2005. p.87-95.

MEREDITH, M; SAKAMOTO, T.; FERRÉ, A. (Ed.) *From control to design: parametric/algorithmic architecture*. Barcelona: Actar, 2008.

MOUSSAVI, F. *The Function of Form*. New York: Harvard University, 2009.

MOLINARE, A. *¿Qué es el diseño paramétrico?*. Plataforma Arquitectura, 09 nov. 2011. Disponível em: < <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-118243/que-es-el-diseno-parametrico>>. Acessado em 13 de dezembro de 2014.

NATIVIDADE, Veronica. *Fraturas metodológicas nas arquiteturas digitais*. São Paulo: USP, 2010. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2010.

NOVAK, M. *ZeichenBau : Virtualités réelle*, 2000 Disponível em < <http://www.archilab.org/public/2000/catalog/novak/novakfr.htm> > Acesso em: 18 de janeiro de 2014.

NOX. *Projects: HtwoOexpo* . Disponível em: < <http://www.nox-art-architecture.com/>>. Acessado em 18 de novembro de 2014.

OXMAN, R. *Theory and design in the first age*. Design Studies, v. 27, n. 3, p. 229-265, 2006.

OXMAN, R. *Performance-based design: current practices and research issues*. International Journal of Architectural Computing, v. 6, n. 1, p. 1-17, 2008.

OXMAN, R.; OXMAN, R. (Ed.). *The New Structuralism: design, engineering and architectural technologies*. In: Architectural Design. Wiley, Londres, 2010.

PEDRESCHI, R. *Form, force and structure: a brief history*. In: HENSEL, M.; MENGES, A. *Versatility and Vicissitude: Performance in morpho-ecological Design*. Londres: Architectural Design, Mar.-Abr. 2008. p.12-19.

PERES, A. *AD Classics: Sydney Opera House / Jørn Utzon*. Archdaily, 23 jun. 2010. Disponível em: < <http://www.archdaily.com/65218/ad-classics-sydney-opera-house-j%C3%B8rn-utzon/>> Acessado em 01 de novembro de 2014.

PETERS, B.; DAVIS, D. *Design Ecosystems: Customising the Architectural Design Environment with Software Plug-ins*. In: PETERS, B; KESTELIER, X. (Ed.) *Computation Works: the building of algorithmic thought*. Londres: Architectural Design, Mar.-Abr. 2013. p.124-131.

POTTMAN, H.; ASPERL, A.; HOFER, M.; KILIAN, A. *Architectural Geometry*. Exton, Pennsylvania USA: Bentley Institute Press, 2007.

REAS, C; MCWILLIAMS, C; LUST. *Form + Code in design, art, and architecture*. New York: Princeton Architectural Press, 2010.

RHINOCEROS. *Rhinoceros: modeling tools for designers. Version 5*. Seattle: Robert McNeel & Associates, 2012. Programa de computador. 1 CD-ROM.

RIZIOTIS, V. A.; VOUTSINAS, S. G.; MANOLAS, D. I. ; POLITIS, E. S.; CHAVIAROPOULOS, P. K. *Aeroelastic Analysis of Pre-Curved Rotor Blades*. Disponível em: < http://proceedings.ewea.org/ewec2010/allfiles2/102_EWEC2010presentation.pdf>. Acessado em 27 de outubro de 2014.

SCAN&SOLVE. *Scan&Solve™: FEA without Meshing White Paper*. Madison, California: Intact Solutions, 2009.

SCAN&SOLVE. *Scan&Solve™ 2014 Plug-in for Rhino. Version 2014.6.16.0*. Madison, California: Intact Solutions, 2014. Disponível em: < http://www.intact-solutions.com/site2014/download_sns_frontend.php>. Acesso em 23 de fevereiro de 2014.

SCHWITTER, C. *Engineering complexity: performance-based design in use*. In: KOLAREVIC, B. *Performative Architecture beyond instrumentality*. Nova Iorque: Spon Press, 2005. p. 113-122.

SOM (SKIDMORE, OWINGS & MERRILL LLP). *Nature/ Structure, Structural Efficiency Through Natural Geometries*. Disponível em: <http://www.som.com/ideas/research/nature__structure>. Acesso em 10 de novembro de 2014.

SPUYBROEK, L. *The Architecture of Continuity*. Rotterdam: V2_ publishing, 2008

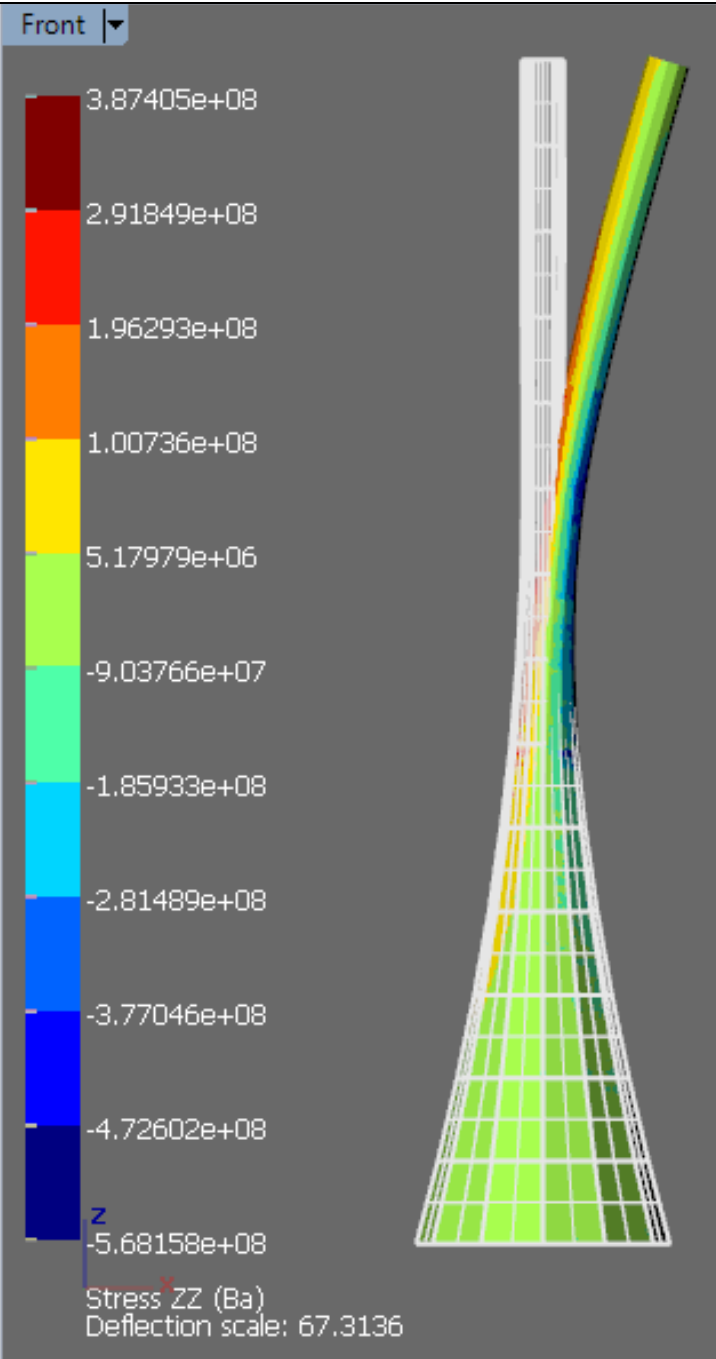
TERZIDIS, K. *Algorithmic Form* (2003) In: AHLQUIST, S; MENGES, A. (Ed.) *Computational Design Thinking*. London: John Wiley & Sons Ltd, 2011. p.94-101.

TERZIDIS, K. *Algorithmic Algorithmic*. 1. ed. Nova Iorque: Routledge, 2006.

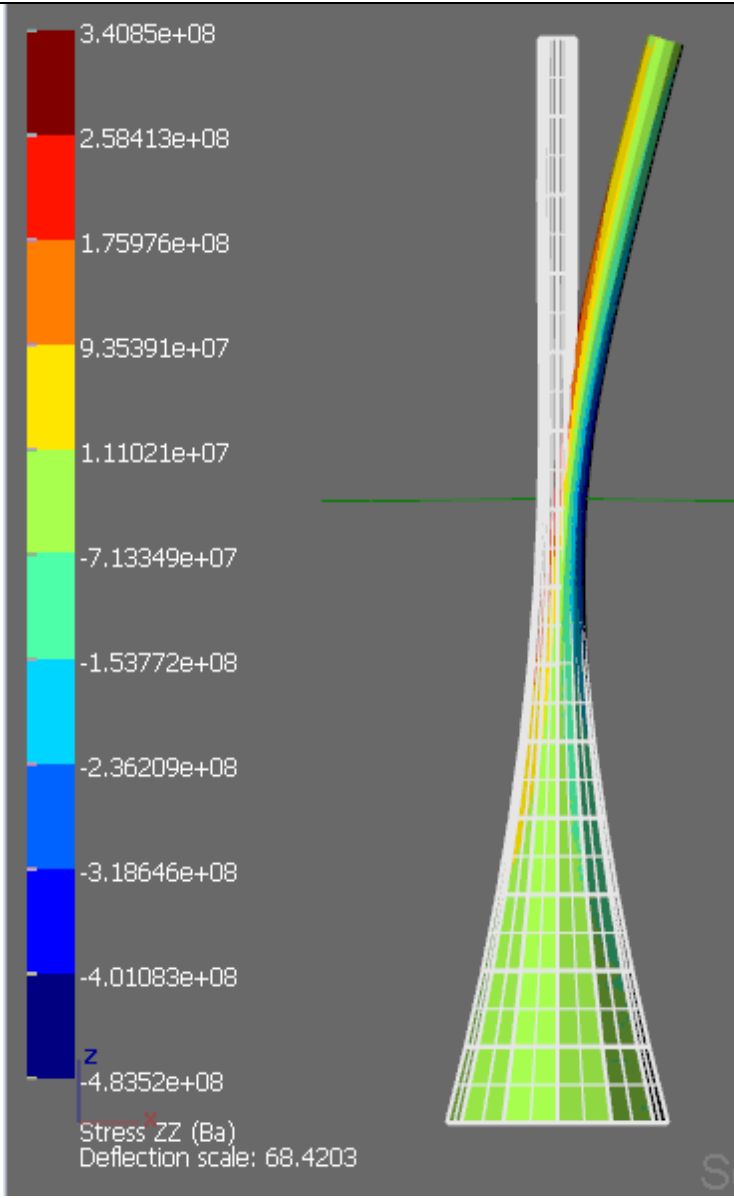
UMAKOSHI, E. M. *Avaliação de desempenho ambiental e arquitetura paramétrica e generativa para o projeto do edifício alto*. São Paulo: USP, 2014. Tese (Doutorado) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2014.

VALLOUREC TUBOS DO BRASIL. *Tubos Estruturais, Seção Circular, Quadrada e Retangular*. Catálogo 2014.

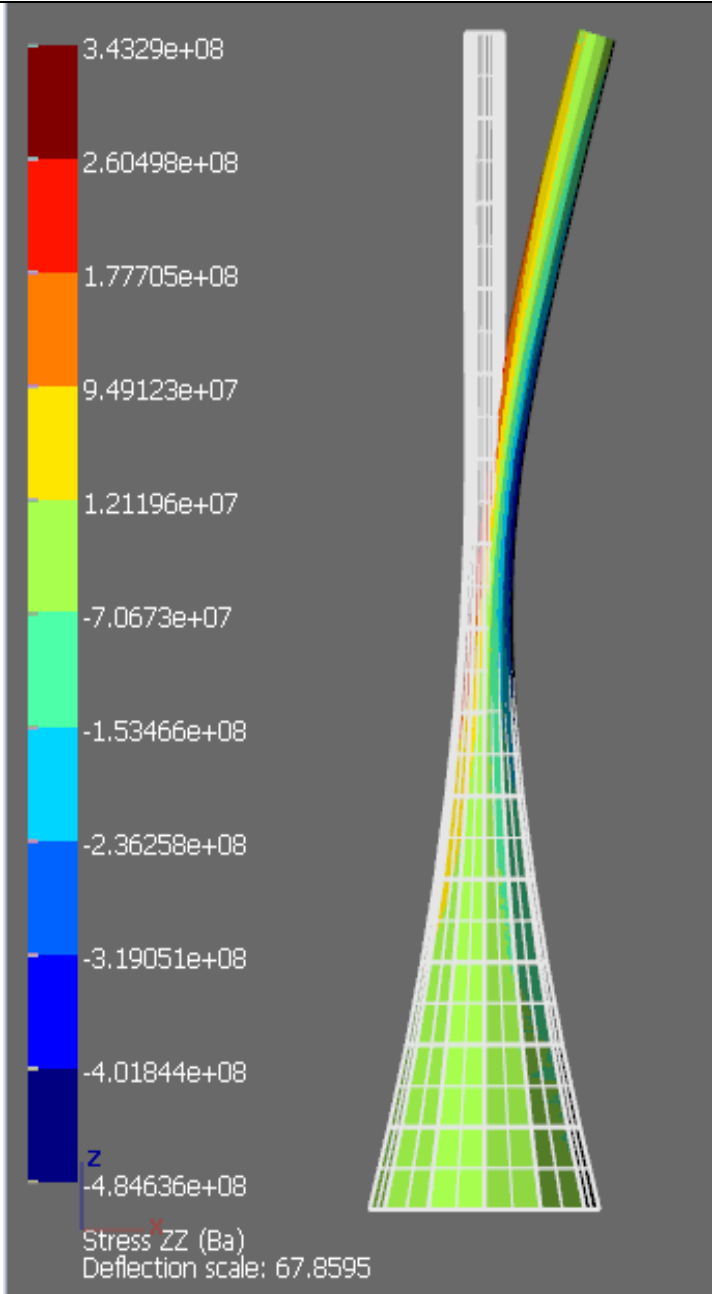
APÊNDICE A – TENSÕES EM ZZ PARA MALHA COM 9999 ELEMENTOS

Representação gráfica do Scan&Solve	Tensões em cada módulo (pontos superiores, médios e inferiores)
 Front 3.87405e+08 2.91849e+08 1.96293e+08 1.00736e+08 5.17979e+06 -9.03766e+07 -1.85933e+08 -2.81489e+08 -3.77046e+08 -4.72602e+08 -5.68158e+08 Stress ZZ (Ba) Deflection scale: 67.3136	1 -5,32x10 ⁷ -8,81x10 ⁷ -1,24x10⁸
	2 -1,24x10 ⁸ -1,54x10 ⁸ -1,82x10⁸
	3 -1,82x10 ⁸ -2,18x10 ⁸ -2,35x10⁸
	4 -2,35x10 ⁸ -2,95x10 ⁸ -3,31x10⁸
	5 -3,31x10 ⁸ -4,29x10 ⁸ -5,02x10⁸
	6 -5,02x10 ⁸ -4,51x10 ⁸ -4,13x10 ⁸
	7 -4,13x10 ⁸ -5,68x10⁸ (tensão máxima) -4,20x10 ⁸
	8 -4,20x10 ⁸ -2,54x10 ⁸ -4,13x10 ⁸
	9 -4,13x10 ⁸ -2,32x10 ⁸ -1,99x10 ⁸
	10 -1,99x10 ⁸ -1,99x10 ⁸ -1,33x10 ⁸
	11 -1,33x10 ⁸ -1,08x10 ⁸ -8,27x10 ⁷
	12 -8,27x10 ⁷ -5,67x10 ⁶ -6,95x10 ⁷
	13 -6,95x10 ⁷ -6,65x10 ⁷ -7,65x10⁷
	14 -7,65x10 ⁷ -5,05x10 ⁷ -6,54x10 ⁷

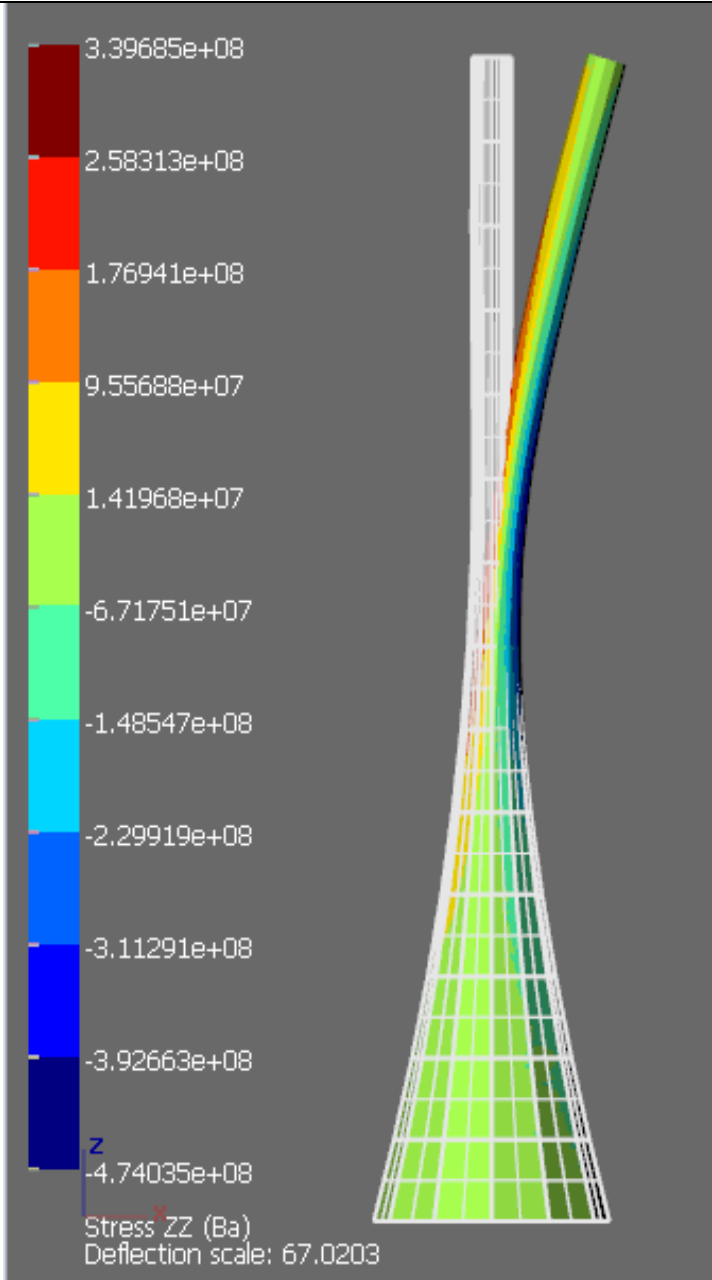
APÊNDICE B – TENSÕES EM ZZ PARA MALHA COM 157000 ELEMENTOS

Representação gráfica do Scan&Solve	Tensões em cada módulo (pontos superiores, médios e inferiores)
	1 -4,81x10 ⁷ -9,16x10 ⁷ -1,16x10⁸
	2 -1,16x10 ⁸ -1,45x10 ⁸ -1,75x10⁸
	3 -1,75x10 ⁸ -2,02x10 ⁸ -2,62x10⁸
	4 -2,62x10 ⁸ -2,95x10 ⁸ -3,22x10⁸
	5 -3,22x10 ⁸ -3,83x10 ⁸ -4,18x10⁸
	6 -4,18x10 ⁸ -4,37x10 ⁸ -4,83x10⁸
	7 -4,83x10⁸ (tensão máxima) -4,04x10 ⁸ -3,25x10 ⁸
	8 -3,25x10⁸ -2,91x10 ⁸ -2,50x10 ⁸
	9 -2,50x10⁸ -1,76x10 ⁸ -1,82x10 ⁸
	10 -1,82x10⁸ -1,53x10 ⁸ -1,26x10 ⁸
	11 -1,26x10⁸ -1,20x10 ⁸ -1,03x10 ⁸
	12 -1,03x10⁸ -9,10x10 ⁷ -7,63x10 ⁷
	13 -7,63x10⁷ -7,39x10 ⁷ -6,70x10 ⁷
	14 -6,70x10⁷ -6,30x10 ⁷ -4,42x10 ⁷

APÊNDICE C – TENSÕES EM ZZ PARA MALHA COM 201100 ELEMENTOS

Representação gráfica do Scan&Solve	Tensões em cada módulo (pontos superiores, médios e inferiores)
	1 -3,19x10 ⁷ -8,39x10⁷ -1,20x10 ⁸
	2 -1,20x10 ⁸ -1,53x10 ⁸ -1,85x10⁸
	3 -1,85x10 ⁸ -2,11x10 ⁸ -2,41x10⁸
	4 -2,41x10 ⁸ -2,71x10 ⁸ -3,40x10⁸
	5 -3,40x10 ⁸ -3,61x10 ⁸ -4,27x10⁸
	6 -4,27x10 ⁸ -4,03x10 ⁸ -4,84x10⁸
	7 -4,84x10⁸ (tensão máxima) -4,35x10 ⁸ -3,60x10 ⁸
	8 -3,60x10⁸ -2,99x10 ⁸ -2,59x10 ⁸
	9 -2,59x10⁸ -1,81x10 ⁸ -1,84x10 ⁸
	10 -1,84x10⁸ -1,80x10 ⁸ -1,38x10 ⁸
	11 -1,38x10⁸ -9,81x10 ⁷ -1,13x10 ⁸
	12 -1,13x10⁸ -8,11x10 ⁷ -7,84x10 ⁷
	13 -7,84x10⁷ -7,34x10 ⁷ -7,42x10 ⁷
	14 -7,42x10⁷ -5,61x10 ⁷ -6,74x10 ⁷

APÊNDICE D– TENSÕES EM ZZ PARA MALHA COM 500000 ELEMENTOS

Representação gráfica do Scan&Solve	Tensões em cada módulo (pontos superiores, médios e inferiores)
 3.39685e+08 2.58313e+08 1.76941e+08 9.55688e+07 1.41968e+07 -6.71751e+07 -1.48547e+08 -2.29919e+08 -3.11291e+08 -3.92663e+08 -4.74035e+08 Stress ZZ (Ba) Deflection scale: 67.0203	1 -4,91x10 ⁷ -8,76x10⁷ -1,21x10 ⁸
	2 -1,21x10 ⁸ -1,50x10 ⁸ -1,82x10⁸
	3 -1,82x10 ⁸ -2,15x10 ⁸ -2,47x10⁸
	4 -2,47x10 ⁸ -2,92x10 ⁸ -3,41x10⁸
	5 -3,41x10 ⁸ -3,81x10 ⁸ -4,17x10⁸
	6 -4,17x10 ⁸ -4,74x10⁸ (tensão máxima) -4,15x10 ⁸
	7 -4,15x10⁸ -3,89x10 ⁸ -3,57x10 ⁸
	8 -3,57x10⁸ -2,79x10 ⁸ -2,63x10 ⁸
	9 -2,63x10⁸ -1,79x10 ⁸ -1,82x10 ⁸
	10 -1,82x10⁸ -1,55x10 ⁸ -1,44x10 ⁸
	11 -1,44x10⁸ -1,08x10 ⁸ -1,05x10 ⁸
	12 -1,05x10⁸ -8,27x10 ⁷ -8,72x10 ⁷
	13 -8,72x10⁷ -7,30x10 ⁷ -7,87x10 ⁷
	14 -7,87x10 ⁷ -6,46x10 ⁷ -7,87x10⁷

APÊNDICE D – SUMÁRIO DO SCAN&SOLVE PARA MALHA COM 157000 ELEMENTOS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Thu Sep 04, 2014 21:00:05

Geometry



Geometry Summary

Quantity	Unit
Volume	4.34081e+08 cm ³
Surface Area	8.99073e+07 cm ²
Mass	3.40754e+09 g
Bounding Box	
min. corner	{1649, -1500, -2.63788}
max. corner	{4649, 1500, 14000}

Material Properties

Property	Value
Description	VMB350
Density	7.85 g/cm ³
Elastic Modulus	2e+12 Ba
Poisson Ratio	0.3
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	3.5e+09 Ba

Load Summary

Description	Type	Definition
binario negativo	Vector Force	{0,0,-2.21718e+06} N
binario positivo	Vector Force	{0,0,2.21718e+06} N
carga horizontal	Vector Force	{955000,0,0} N
carga permanente	Vector Force	{0,0,-2.78e+06} N
Body Load	Gravity	{0, 0, -980.665} cm/s ²

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 2	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Settings

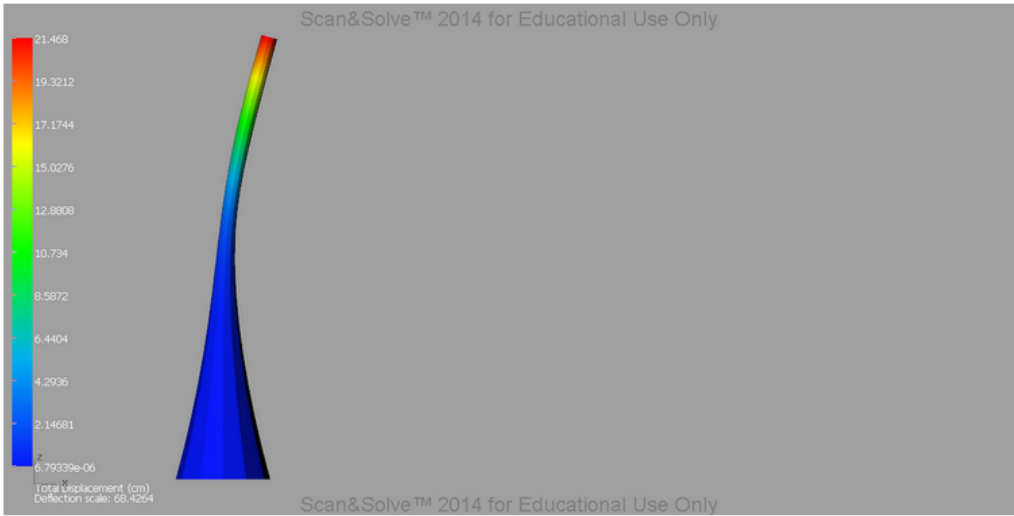
Basis Functions	
Degree	1
nx	117
ny	117
nz	539
Element size	{26.0538, 26.0538, 26.0538}
Resolution setting	157000
Computation Box	
min. corner	{1624.88, -1524.12, -22.7826}
max. corner	{4673.17, 1524.17, 14020.2}

Units

Quantity	Unit
Length	cm
Mass	g
Force	dyn
Time	s

Simulation Results

Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	6.79339e-06 cm	{1840.61,733.563,0}
Maximum	21.468 cm	{3389,3.69944e-15,14000}

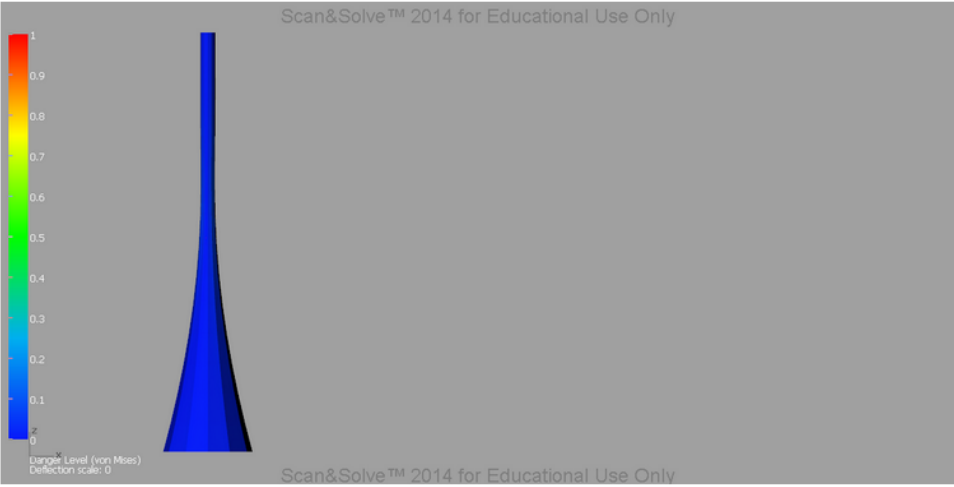
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	1.25879e+06 Ba	{2158.94,-61.5049,1958.02}
Maximum	5.11548e+08 Ba	{3346.31,-110.627,9000.9}

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	0.000359655	{2158.94,-61.5049,1958.02}
Maximum	0.146157	{3346.31,-110.627,9000.9}

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-0.0181821 cm	21.4287 cm
Y-Displacement	-0.0150687 cm	0.0151178 cm
Z-Displacement	-1.34559 cm	0.697952 cm
Total Displacement	6.79339e-06 cm	21.468 cm
Von Mises Stress	1.25879e+06 Ba	5.11548e+08 Ba
Max. Principal Stress	-9.44695e+07 Ba	4.20438e+08 Ba
Mid. Principal Stress	-1.24076e+08 Ba	8.41735e+07 Ba
Min. Principal Stress	-6.20178e+08 Ba	6.46578e+07 Ba
Danger Level (von Mises)	0.000359655	0.146157
Danger Level (Max. Shear Stress)	0.000411881	0.150202

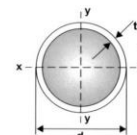
CAUTION

Design decisions require experimental data and substantial experience; they should never be made based solely on a software simulation. Simulation is not intended to replace physical testing of prototypes, which is required to validate any design.

ANEXO A – TABELA VALLOUREC DE TUBOS ESTRUTURAIS SEÇÃO CIRCULAR

Vallourec / Tubos Estruturais, Seção Circular, Quadrada e Retangular / p.51

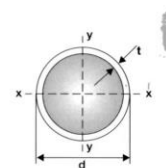
Seção Tubular Circular (TC)



Dimensões externas	Espessura da parede	Massa por Unidade de Comp.	Área da Seção Transversal	Momento de Inércia	Raio de Giração	Módulo de Resistência Elástico	Módulo de Resistência Plástico	Const. Torção	Módulo de Resistência à Torção	Área de superfície por unidade de Comp.
d (mm)	t (mm)	m (kg/m)	A (cm²)	$I_x = I_y$ (cm⁴)	$r_x = r_y$ (cm)	$W_x = W_y$ (cm³)	$Z_x = Z_y$ (cm³)	J (cm⁴)	W_t (cm³)	U (m²/m)
33,4	3,2	2,38	3,04	3,50	1,07	2,10	2,93	7,00	4,19	0,105
	3,6	2,65	3,37	3,80	1,06	2,27	3,21	7,59	4,55	
38,1	3,2	2,75	3,51	5,39	1,24	2,83	3,91	10,8	5,66	0,120
	3,6	3,06	3,90	5,87	1,23	3,08	4,30	11,7	6,16	
42,2	4,0	3,36	4,29	6,31	1,21	3,31	4,67	12,6	6,63	0,133
	3,6	3,43	4,37	8,20	1,37	3,89	5,38	16,4	7,77	
	4,0	3,77	4,80	8,85	1,36	4,20	5,86	17,7	8,39	
	4,5	4,18	5,33	9,60	1,34	4,55	6,43	19,2	9,10	
48,3	5,0	4,59	5,84	10,3	1,33	4,88	6,96	20,6	9,75	0,152
	3,6	3,97	5,06	12,7	1,59	5,26	7,21	25,4	10,5	
	4,0	4,37	5,57	13,8	1,57	5,70	7,87	27,5	11,4	
	4,5	4,86	6,19	15,0	1,56	6,21	8,66	30,0	12,4	
	5,0	5,34	6,80	16,2	1,54	6,69	9,42	32,3	13,4	
	5,6	5,90	7,51	17,4	1,52	7,21	10,3	34,8	14,4	
60,3	6,4	6,61	8,42	18,9	1,50	7,83	11,3	37,8	15,7	0,189
	3,6	5,03	6,41	25,9	2,01	8,58	11,6	51,7	17,2	
	4,0	5,55	7,07	28,2	2,00	9,34	12,7	56,3	18,7	
	4,5	6,19	7,89	30,9	1,98	10,2	14,0	61,8	20,5	
	5,0	6,82	8,69	33,5	1,96	11,1	15,3	67,0	22,2	
	5,6	7,55	9,62	36,4	1,94	12,1	16,8	72,7	24,1	
	6,4	8,51	10,8	39,9	1,92	13,2	18,7	79,8	26,5	
	7,1	9,32	11,9	42,7	1,90	14,2	20,2	85,5	28,3	
73,0	8,0	10,3	13,1	46,0	1,87	15,3	22,1	92,0	30,5	0,229
	8,8	11,2	14,2	48,6	1,85	16,1	23,6	97,2	32,2	
	3,6	6,16	7,85	47,4	2,46	13,0	17,4	94,8	26,0	
	4,0	6,81	8,67	51,8	2,44	14,2	19,1	104	28,4	
	4,5	7,60	9,68	57,0	2,43	15,6	21,1	114	31,3	
	5,0	8,38	10,7	62,1	2,41	17,0	23,2	124	34,0	
	5,6	9,31	11,9	67,8	2,39	18,6	25,5	136	37,1	
	6,4	10,5	13,4	74,9	2,37	20,5	28,5	150	41,1	
	7,1	11,5	14,7	80,7	2,34	22,1	31,0	161	44,2	
	8,0	12,8	16,3	87,6	2,32	24,0	34,0	175	48,0	
	8,8	13,9	17,7	93,2	2,29	25,5	36,5	186	51,0	
73,0	10,0	15,5	19,8	101	2,26	27,6	40,0	201	55,2	
	11,0	16,8	21,4	106	2,23	29,1	42,7	212	58,2	

As bitolas destacadas com faixa cinza são mais frequentemente produzidas e devem ser adotadas preferencialmente.
Para outras bitolas, consultar sobre quantidades mínimas de fabricação e prazo de entrega.

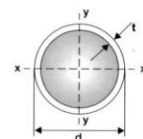
Seção Tubular Circular (TC)



Dimensões externas	Espessura da parede	Massa por Unidade de Comp.	Área da Seção Transversal	Momento de Inércia	Raio de Giração	Módulo de Resistência Elástico	Módulo de Resistência Plástico	Const. Torção	Módulo de Resistência à Torção	Área de superfície por unidade de Comp.
d (mm)	t (mm)	m (kg/m)	A (cm²)	$I_x = I_y$ (cm⁴)	$r_x = r_y$ (cm)	$W_x = W_y$ (cm³)	$Z_x = Z_y$ (cm³)	J (cm⁴)	W_t (cm³)	U (m²/m)
88,9	3,6	7,57	9,65	87,9	3,02	19,8	26,2	176	39,5	0,279
	4,0	8,38	10,7	96,3	3,00	21,7	28,9	193	43,3	
	4,5	9,37	11,9	107	2,99	24,0	32,1	213	47,9	
	5,0	10,3	13,2	116	2,97	26,2	35,2	233	52,4	
	5,6	11,5	14,7	128	2,95	28,7	38,9	255	57,5	
	6,4	13,0	16,6	142	2,93	31,9	43,6	284	63,9	
	7,1	14,3	18,2	154	2,90	34,6	47,6	308	69,2	
	8,0	16,0	20,3	168	2,87	37,8	52,5	336	75,6	
	8,8	17,4	22,1	180	2,85	40,4	56,7	359	80,9	
	10,0	19,5	24,8	196	2,81	44,1	62,6	392	88,2	
	11,0	21,1	26,9	208	2,78	46,9	67,2	417	93,7	
	12,5	23,6	30,0	225	2,74	50,6	73,6	450	101	
101,6	4,0	9,63	12,3	146	3,45	28,8	38,1	293	57,6	0,319
	4,5	10,8	13,7	162	3,44	31,9	42,5	324	63,8	
	5,0	11,9	15,2	177	3,42	34,9	46,7	355	69,9	
	5,6	13,3	16,9	195	3,40	38,4	51,7	390	76,9	
	6,4	15,0	19,1	218	3,37	42,9	58,1	436	85,8	
	7,1	16,5	21,1	237	3,35	46,6	63,5	473	93,2	
	8,0	18,5	23,5	260	3,32	51,1	70,3	519	102	
	8,8	20,1	25,7	279	3,30	54,9	76,0	557	110	
	10,0	22,6	28,8	305	3,26	60,1	84,2	611	120	
	11,0	24,6	31,3	326	3,23	64,2	90,7	652	128	
	12,5	27,5	35,0	354	3,18	69,7	99,9	708	139	
114,3	4,0	10,9	13,9	211	3,90	36,9	48,7	422	73,9	0,359
	4,5	12,2	15,5	234	3,89	41,0	54,3	469	82,0	
	5,0	13,5	17,2	257	3,87	45,0	59,8	514	89,9	
	5,6	15,0	19,1	283	3,85	49,6	66,2	566	99,1	
	6,4	17,0	21,7	317	3,82	55,4	74,6	634	111	
	7,1	18,8	23,9	345	3,80	60,4	81,7	690	121	
	8,0	21,0	26,7	379	3,77	66,4	90,6	759	133	
	8,8	22,9	29,2	409	3,74	71,5	98,2	817	143	
	10,0	25,7	32,8	450	3,70	78,7	109	899	157	
	11,0	28,0	35,7	482	3,67	84,3	118	963	169	
	12,5	31,4	40,0	526	3,63	92,0	130	1.051	184	
	14,2	35,1	44,7	571	3,57	99,8	143	1.141	200	

As bitolas destacadas com faixa cinza são mais frequentemente produzidas e devem ser adotadas preferencialmente.
Para outras bitolas, consultar sobre quantidades mínimas de fabricação e prazo de entrega.

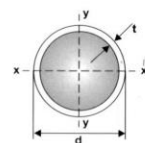
Seção Tubular Circular (TC)



Dimensões externas	Espessura da parede	Massa por Unidade de Comp.	Área da Seção Transversal	Momento de Inércia	Raio de Giração	Módulo de Resistência Elástico	Módulo de Resistência Plástico	Const. Torção	Módulo de Resistência à Torção	Área de superfície por unidade de Comp.
d (mm)	t (mm)	m (kg/m)	A (cm²)	$I_x = I_y$ (cm⁴)	$r_x = r_y$ (cm)	$W_x = W_y$ (cm³)	$Z_x = Z_y$ (cm³)	J (cm⁴)	W_t (cm³)	U (m²/m)
141,3	5,0	16,8	21,4	498	4,82	70,5	92,9	996	141	0,444
	5,6	18,7	23,9	550	4,80	77,9	103	1.101	156	
	6,4	21,3	27,1	618	4,77	87,5	117	1.237	175	
	7,1	23,5	29,9	676	4,75	95,6	128	1.352	191	
	8,0	26,3	33,5	747	4,72	106	142	1.494	211	
	8,8	28,8	36,6	807	4,69	114	155	1.615	229	
	10,0	32,4	41,2	894	4,66	127	173	1.788	253	
	11,0	35,3	45,0	962	4,62	136	187	1.925	272	
	12,5	39,7	50,6	1.059	4,58	150	208	2.117	300	
	14,2	44,5	56,7	1.159	4,52	164	230	2.318	328	
	16,0	49,4	63,0	1.256	4,47	178	253	2.512	356	
168,3	17,5	53,4	68,1	1.330	4,42	188	270	2.660	377	0,529
	5,0	20,1	25,7	856	5,78	102	133	1.712	203	
	5,6	22,5	28,6	948	5,76	113	148	1.897	225	
	6,4	25,6	32,6	1.068	5,73	127	168	2.136	254	
	7,1	28,2	36,0	1.170	5,70	139	185	2.340	278	
	8,0	31,6	40,3	1.297	5,67	154	206	2.595	308	
	8,8	34,6	44,1	1.407	5,65	167	224	2.813	334	
	10,0	39,0	49,7	1.564	5,61	186	251	3.128	372	
	11,0	42,7	54,4	1.689	5,57	201	273	3.379	402	
	12,5	48,0	61,2	1.868	5,53	222	304	3.737	444	
	14,2	54,0	68,7	2.058	5,47	245	338	4.116	489	
219,1	16,0	60,1	76,6	2.244	5,41	267	372	4.488	533	0,688
	17,5	65,1	82,9	2.388	5,37	284	400	4.777	568	
	20,0	73,1	93,2	2.608	5,29	310	443	5.216	620	
	6,4	33,6	42,8	2.421	7,52	221	290	4.841	442	
	7,1	37,1	47,3	2.660	7,50	243	319	5.319	486	
	8,0	41,6	53,1	2.960	7,47	270	357	5.919	540	
	8,8	45,6	58,1	3.220	7,44	294	389	6.439	588	
	10,0	51,6	65,7	3.598	7,40	328	438	7.197	657	
	11,0	56,5	71,9	3.904	7,37	356	477	7.807	713	
	12,5	63,7	81,1	4.345	7,32	397	534	8.689	793	
	14,2	71,8	91,4	4.820	7,26	440	597	9.640	880	
219,1	16,0	80,1	102	5.297	7,20	483	661	10.593	967	0,688
	17,5	87,0	111	5.673	7,15	518	713	11.346	1.036	
	20,0	98,2	125	6.261	7,07	572	795	12.523	1.143	
	25,0	120	152	7.298	6,92	666	947	14.597	1.332	

As bitolas destacadas com faixa cinza são mais frequentemente produzidas e devem ser adotadas preferencialmente.
Para outras bitolas, consultar sobre quantidades mínimas de fabricação e prazo de entrega.

Seção Tubular Circular (TC)



Dimensões externas	Espessura da parede	Massa por Unidade de Comp.	Área da Seção Transversal	Momento de Inércia	Raio de Giração	Módulo de Resistência Elástico	Módulo de Resistência Plástico	Const. Torção	Módulo de Resistência à Torção	Área de superfície por unidade de Comp.
d (mm)	t (mm)	m (kg/m)	A (cm²)	$I_x = I_y$ (cm⁴)	$r_x = r_y$ (cm)	$W_x = W_y$ (cm³)	$Z_x = Z_y$ (cm³)	J (cm⁴)	W_t (cm³)	U (m²/m)
273,0	6,4	42,1	53,6	4.765	9,43	349	455	9.530	698	0,858
	7,1	46,6	59,3	5.245	9,40	384	502	10.491	769	
	8,0	52,3	66,6	5.852	9,37	429	562	11.703	857	
	8,8	57,3	73,0	6.380	9,35	467	614	12.760	935	
	10,0	64,9	82,6	7.154	9,31	524	692	14.308	1.048	
	11,0	71,1	90,5	7.783	9,27	570	756	15.565	1.140	
	12,5	80,3	102	8.697	9,22	637	849	17.395	1.274	
	14,2	90,6	115	9.695	9,16	710	952	19.390	1.421	
	16,0	101	129	10.707	9,10	784	1.058	21.414	1.569	
	17,5	110	140	11.516	9,05	844	1.144	23.032	1.687	
	20,0	125	159	12.798	8,97	938	1.283	25.597	1.875	
	25,0	153	195	15.127	8,81	1.108	1.543	30.254	2.216	
323,8	30,0	180	229	17.162	8,66	1.257	1.780	34.324	2.515	1,017
	6,4	50,1	63,8	8.040	11,2	497	645	16.079	993	
	7,1	55,5	70,6	8.861	11,2	547	712	17.722	1.095	
	8,0	62,3	79,4	9.901	11,2	612	798	19.801	1.223	
	8,8	68,4	87,1	10.810	11,1	668	873	21.619	1.335	
	10,0	77,4	98,6	12.147	11,1	750	985	24.293	1.501	
	11,0	84,9	108	13.237	11,1	818	1.077	26.474	1.635	
	12,5	96,0	122	14.832	11,0	916	1.212	29.664	1.832	
	14,2	108	138	16.583	11,0	1.024	1.362	33.166	2.049	
	16,0	121	155	18.372	10,9	1.135	1.517	36.744	2.270	
	17,5	132	168	19.813	10,8	1.224	1.644	39.626	2.448	
	20,0	150	191	22.117	10,8	1.366	1.849	44.235	2.732	
355,6	25,0	184	235	26.374	10,6	1.629	2.237	52.747	3.258	1,117
	8,0	68,6	87,4	13.201	12,3	742	967	26.403	1.485	
	8,8	75,3	95,9	14.423	12,3	811	1.059	28.846	1.622	
	10,0	85,2	109	16.223	12,2	912	1.195	32.447	1.825	
	11,0	93,5	119	17.695	12,2	995	1.307	35.389	1.990	
	12,5	106	135	19.852	12,1	1.117	1.472	39.704	2.233	
	14,2	120	152	22.227	12,1	1.250	1.656	44.455	2.500	
	16,0	134	171	24.663	12,0	1.387	1.847	49.326	2.774	
	17,5	146	186	26.631	12,0	1.498	2.002	53.263	2.996	
355,6	20,0	166	211	29.792	11,9	1.676	2.255	59.583	3.351	1,117
	25,0	204	260	35.677	11,7	2.007	2.738	71.353	4.013	

As bitolas destacadas com faixa cinza são mais frequentemente produzidas e devem ser adotadas preferencialmente.
Para outras bitolas, consultar sobre quantidades mínimas de fabricação e prazo de entrega.