



**ESCOLA DE ENGENHARIA  
FACULDADE DE ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

Florence Endres Chechi

**DESIGN E AVALIAÇÃO AERODINÂMICA DA TOPOLOGIA GEOMÉTRICA  
SUPERFICIAL DE VENTOINHAS**

Porto Alegre

2014



**ESCOLA DE ENGENHARIA  
FACULDADE DE ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

Florence Endres Chechi

**DESIGN E AVALIAÇÃO AERODINÂMICA DA TOPOLOGIA GEOMÉTRICA  
SUPERFICIAL DE VENTONHAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para a obtenção do Grau de Mestre em Design.

Orientador: Prof. Dr. Joyson Pacheco

Porto Alegre

2014

Cechi, Florence Endres

Design e Avaliação Aerodinâmica da Topologia Geométrica Superficial de Ventoinhas/ Florence Endres Cechi – 2014.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Faculdade de Arquitetura. Programa de Pós-Graduação em Design. Porto Alegre, BR-RS, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco

1. Design de Ventoinhas. 2. Avaliação Aerodinâmica 3. Topologia Geométrica 4. Superfícies de Ventoinhas

Florence Endres Chechi

## **DESIGN E AVALIAÇÃO AERODINÂMICA DA TOPOLOGIA GEOMÉTRICA SUPERFICIAL DE VENTONHAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 14 de outubro de 2014.

---

Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco

Orientador

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Wilson kindlein Jr.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Gustavo Javier Zani Núñez

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Adriane Prisco Petry

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

Ao cargo técnico da UFRGS, especialmente aos senhores Carlos Alberto Kern Thomas, João da Rosa Batista, João Manoel Tessaro, Prof. Juan Carlos Sandoval Ortiz, Prof. Luis Henrique Cândido, Laboratório de Design e Seleção de Materiais, Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer e o meu orientador Prof. Joyson Pacheco, grupo de pessoas e laboratórios a que sou grata e que se empenharam em tornar possível este trabalho até a etapa final. Este trabalho foi realizado com o apoio do órgão CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

## RESUMO

CHECHI, Florence Endres. **Design e avaliação aerodinâmica da topologia geométrica superficial de ventoinhas**. Porto Alegre, 2014. Dissertação (Mestrado em Design), Programa de Pós-Graduação em Design, UFRGS, 2014.

Este trabalho tem como eixo principal a avaliação experimental de texturas para superfícies de pás com intuito de aumentar a eficiência de ventoinhas de pequeno porte em relação às ventoinhas padrão (com pás lisas), através das variáveis também investigar de forma qualitativa o potencial de diferentes topologias no efeito estético. A ênfase está na modelagem de texturas para a superfície das pás de cada ventoinha, que foram trabalhadas a fim de diminuir a quantidade de escoamento de ar necessária para o funcionamento da mesma. Para os testes feitos, foi escolhida como base a ventoinha de um *Cooler*, utilizada geralmente para arrefecimento do processador de computadores, que devido à pequena escala proporciona facilidade de manuseio. A análise aconteceu através dos resultados que cada superfície projetada apresentou no túnel aerodinâmico, assim permitindo avaliar a eficiência em relação à superfície lisa. Os parâmetros como a velocidade do escoamento de ar, velocidade do corpo de prova e as relações entre essas velocidades foram definidas por um método específico para este trabalho. Espera-se como resultado que o uso das texturas com a distribuição de massa adequada consiga reduzir a necessidade de escoamento de ar para o funcionamento do produto, tornando o processo de rotação mais eficiente e estético.

Palavras-chave: Design de ventoinhas, Avaliação aerodinâmica, Topologia geométrica, superfícies de ventoinhas.

## ABSTRACT

CHECHI, Florence Endres. **Aerodynamic design and evaluation of surface geometric topology fans.** Porto Alegre, 2014. Dissertation (Master of Design), Graduate Program in Design, UFRGS, 2014.

This work has as main shaft creating textures for surfaces of blades in order to increase the efficiency of small fans over its variables. The emphasis is on modeling the surface texture of the blades of each fan to be worked in order to reduce the need to wind to start the start of movement thereof. For testing efficiency it was chosen as the basis of a cooler fan, commonly used for cooling computers, which due to the small scale provides an ease of handling. The analysis of the results that happen through each projected surface present in the wind tunnel, thus allowing to evaluate the efficiency of using these fans in different scales and in different types of blades. The parameters such as wind speed, speed of the specimen, the relationship between these speeds and loads applied to the structure of the fan were used to set a specific method for this work. It is expected a result of the use of textures to achieve proper mass distribution annular wasting energy, making the process more efficient and aesthetic rotation.

Keywords: Design fans, aerodynamic evaluation, geometric topology, surfaces fans.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Digitalização 3D e o resultado modelado em software 3D.....	17
Figura 2 - Pesquisa em Desenvolvimento.....	17
Figura 3 - Um exemplo de leque do século 18.....	18
Figura 4 - O ventilador diametral Mortier - talvez o primeiro tangencial ou ventilador de fluxo cruzado.....	19
Figura 5 - Ventilador axial de baixa pressão (doméstico).....	20
Figura 6 - Partes do rotor aerodinâmico.....	20
Figura 7 - Crise do arrasto.....	30
Figura 8 - Esquema de escoamentos.....	32
Figura 9 - Separação da camada limite em uma esfera; (a) laminar e (b) turbulenta. ....	33
Figura 10 - Silent Eagle 2000.....	33
Figura 11 - Medição da temperatura da CPU.....	36
Figura 12 - Set experimental em frente a barragem (Olef-Talsperre, Hellenthal, Alemanha).....	39
Figura 13 - Transformação de um verdadeiro falcão (A) para um modelo de tamanho real (B).....	39
Figura 14 - Modelo de falcão e do dispositivo de medição no interior do túnel aerodinâmico (A). Esquema do funcionamento das forças (B). ....	40
Figura 15 - Estudos de detalhe para as formas específicas de asa.....	41
Figura 16 - Orientação tridimensional da câmera.....	41
Figura 17 - Modelo de falcão pintado com tinta a base de óleo para visualização do escoamento de ar ao redor do modelo. ....	44
Figura 18 - Visualização do escoamento em quatro seções transversais do modelo falcão via particle image velocimetry (PIV). ....	45
Figura 19 - As forças que atuam no falcão.....	46
Figura 20 – Pá feita com ângulo de ataque de 5° e ranhuras no ângulo de saída. ....	47
Figura 21 - Scanner Tridimensional a Laser modelo Digimill 3D.....	48
Figura 22 - Princípio de operação do sensor conoscópico a Laser do Scanner Optimet.....	49
Figura 23 - Esquema de prototipação rápida. ....	50



Figura 24 - Modelo feito através da tecnologia polyjet. ....	52
Figura 25 - Selective Laser Sintering Objet Connex350 Multi-Material 3D Printer.....	53
Figura 26 - Tecnologia 3D aplicada à área médica (reconstrução do crânio de um paciente).....	54
Figura 27 - Modelo enviado ao CTI para avaliação técnica. ....	54
Figura 28 - Algumas das máquinas da Divisão de Tecnologias Tridimensionais do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI). ....	55
Figura 29 - Túnel aerodinâmico 1 - Monitorado para testes de perfis aerodinâmicos. ....	56
Figura 30–Ilustração do Túnel Aerodinâmico 1 .....	57
Figura 31–Ilustração do Túnel 2 - simulador túnel de vento (sem estabilizador). ....	57
Figura 32 - Túnel 2– Simulador túnel de Vento. ....	58
Figura 33 - Túnel aerodinâmico Prof. Debi Pada Sadhu. ....	59
Figura 34 - Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann. ....	59
Figura 35 - Crise do arrasto durante a trajetória de uma bola texturizada em comparação com uma bola lisa.....	63
Figura 36 - Peça no LdSM da UFRGS sendo digitalizada no Scanner Tridimensional a Laser modelo Digimill 3D, em vista superior. ....	64
Figura 37 - Imagem enviada pelo scanner para o Software Geomagic.....	65
Figura 38 - Imagem editada pelo Geomagic, enviada para o software 3DSMax. ....	65
Figura 39 - (A) Malha fiel a peça escaneada. (B) Malha simplificada e mais ordenada em 3DSMax. ....	66
Figura 40 - Resultado do encaixe das sete pás no eixo, ambos modelados com base na malha gerada pelo escaneamento. ....	66
Figura 41 - Ventoinha suavizada em todos os pontos.....	67
Figura 42 - Ventoinha padrão modelada com base na peça cooler escaneada. ....	67
Figura 43 - Desenho do cilindro central.....	68
Figura 44 - Momento de replicação e acoplação das pás. ....	69
Figura 45 - Construção da pá base. ....	69
Figura 46 - Construção da curvatura da pá.....	70

Figura 47 - Processo de impressão das ventoinhas.....	70
Figura 48 – Processo de impressão e de retirada da máquina. ....	71
Figura 49 - Processo de retirada do material de suporte. ....	72
Figura 50 - Ever Cool FAN-AL12025M12CA.(corpo de prova).....	73
Figura 51 - Caixa metálica, denominada “pulmão”.....	74
Figura 52 - Bandeja de alumínio para depositar o óleo (sistema interno do pulmão de fumaça).....	74
Figura 53 - Anemômetro Incoterm.....	75
Figura 54 - Multímetro Animpa. ....	77
Figura 55 - Contador de Voltas. ....	78
Figura 56 - Circuito do Contador de Voltas. ....	78
Figura 57 - Varivolt Variac.....	79
Figura 58 - Túnel aerodinâmico.....	80
Figura 59 - Dimensões do Túnel aerodinâmico.....	80
Figura 60 - Escoamento no interior do túnel aerodinâmico. ....	81
Figura 61 - Fluxograma Simples de execução dos Testes.....	89
Figura 62 - Corte a laser. ....	90
Figura 63 - 1º grupo de texturas em adesivo.....	91
Figura 64 - 2º grupo de texturas em massa de modelar.....	92
Figura 65 - 3º grupo de texturas. ....	93
Figura 66- Modelagem 3D da ventoinha A. ....	94
Figura 67 - Ventoinha lisa. ....	95
Figura 68 - Modelagem 3D da ventoinha B.....	97
Figura 69–Operação booleana realizada na textura B. ....	98
Figura 70 - Protótipo de ventoinha B.....	98
Figura 71 - Modelagem da textura da ventoinha C. ....	101
Figura 72 - Protótipo de ventoinha C.....	101
Figura 73 - Modelagem do ângulo de 5º da ventoinha D. ....	103
Figura 74 - Protótipo da ventoinha D.....	104
Figura 75 - Modelagem da pá da ventoinha E.....	106
Figura 76 - Modelagem do ângulo da pá da ventoinha E.....	107
Figura 77 - Protótipo da ventoinha E.....	107

## ÍNDICE DE TABELA

Tabela 1- Especificações detalhadas, tal como previsto pela Sharkoon.....	34
Tabela 2 - Sustentação e coeficientes de arrasto para uma direção paralela de fluxo ( $\alpha = 0^\circ$ ) e um ângulo de ataque $\alpha = 5^\circ$ para uma velocidade de 22,5 m/s. ....	42
Tabela 3 - Variação de velocidade do ar. Valores máximos e mínimos alcançados pelo anemômetro. ....	76
Tabela 4 - Variação de temperatura. Valores máximos e mínimos alcançados pelo anemômetro. ....	76
Tabela 5- 1º teste de levantamento de dados.....	85
Tabela 6 - 2º Teste de levantamento de dados.....	86
Tabela 7 - 3º Teste de levantamento de dados.....	87
Tabela 8 - Resultados da ventoinha A. ....	96
Tabela 9 - Resultados ventoinha B .....	99
Tabela 10 - Tabela de resultados da ventoinha C.....	102
Tabela 11 - Resultados da ventoinha D. ....	104
Tabela 12 - Resultados da ventoinha E. ....	108

## ÍNDICE DE GRÁFICO

Gráfico 1 - Velocidade de rotação produzido pelo Silent Eagle 2000.....	35
Gráfico 2 - Ventoinha normal (lisa) - 2000RPM.....	36
Gráfico 3 - Sharkoon Silent Eagle (Texturizada) - 2000RPM.....	37
Gráfico 4 - Variação de $v$ e $\theta$ ângulo na fase de monitoramento.....	42
Gráfico 5 - Coeficiente Aerodinâmico versus número de Reynolds do modelo de falcão para diferentes ângulos de ataque $\alpha$ . ....	43
Gráfico 6 - Representação gráfica dos resultados dos testes com o corpo de prova (para reconhecimento do túnel).....	83
Gráfico 7 - Curva para o 1° Teste.....	86
Gráfico 8 - Curva gerada a partir do 2° teste.....	87
Gráfico 9 - Curva a partir do 3° teste.....	88
Gráfico 10 - Gráfico indicativo da ventoinha A. ....	96
Gráfico 11 - Curva de desempenho da textura B. ....	100
Gráfico 12 - Indicativo de resultados da ventoinha C. ....	102
Gráfico 13 - Gráfico indicativo de resultados da ventoinha D.....	105
Gráfico 14 - Gráfico indicativo da ventoinha E. ....	108
Gráfico 15 - Gráficos geral do resultado.....	111

## SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
1.1 INTRODUÇÃO .....	11
1.2 Problema.....	14
1.3 Hipótese .....	14
1.4 Objetivo Geral .....	14
1.5 Objetivos Específicos .....	14
1.6 Delimitação do Tema .....	15
1.7 Justificativa.....	15
1.8 Contexto da Pesquisa .....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 Ventoinhas .....	18
2.2 Design de superfícies, Texturas e Topologia .....	22
2.3 Texturas do ponto de vista estético.....	24
2.4 Texturas do ponto de vista econômico.....	26
2.5 Normas que estabelecem definições e procedimentos para a medição de superfícies.....	26
2.6 Número de Reynolds (Re).....	27
2.7 Coeficiente de Arrasto (CD) .....	28
2.8 Coeficiente de Sustentação (CL).....	29
2.9 Coeficiente de Pressão (CP).....	29
2.10 Camada Limite .....	30
2.11 escoamentos Laminar e Turbulento.....	31
2.12 Ventoinhas Texturizadas.....	32
2.13 Influência do estudo no corpo do Falcão Peregrino para elaboração de uma das superfícies .....	37

2.14	Visualização do escoamento perto da superfície .....	43
2.15	Resultado do experimento e sua influência na superfície da ventoinha...	46
2.16	Processos de Digitalização .....	47
2.17	Processo de Impressão 3D .....	50
2.18	O Arquivo STL.....	51
2.19	Fotopolimerização .....	51
2.20	Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer .....	52
2.21	Divisão de Tecnologias Tridimensionais (DT3D).....	53
2.22	Túnel Aerodinâmico .....	55
2.23	Túneis do centro de energia eólica PUCRS .....	56
2.24	Túnel aerodinâmico da escola de engenharia mecânica da UFRGS .....	58
2.25	Túnel de vento da escola de engenharia civil .....	59
2.26	Design de Superfícies em pás e escoamento .....	60
2.27	Escoamento de Fluidos e crise do arrasto .....	61
3.	MÉTODOLOGIA EMPREGADA.....	64
3.1	Processo de Digitalização .....	64
3.2	Modelagem geométrica das superfícies das pás .....	68
3.3	Processo de Impressão 3D das superfícies .....	70
3.4	Equipamentos utilizados .....	72
3.4.1	Ventoinha de Teste .....	72
3.4.2	“Pulmão” de Fumaça.....	73
3.4.3	Anemômetro.....	75
3.4.5	Multiteste .....	76
3.4.6	Tacômetro .....	77
3.4.7	VarivoltVariac .....	78
3.4.8	Túnel Aerodinâmico .....	79
4.	RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS .....	82

4.1 Ensaios .....	82
4.2 Número de Reynolds do Túnel aerodinâmico .....	83
4.3 Avaliação da qualidade das superfícies .....	90
4.4 Ensaios Finais .....	94
4.4.1 Ventoinha A.....	94
4.4.2 Ventoinha B.....	97
4.4.3 Ventoinha C.....	100
4.4.4 Ventoinha D.....	103
4.4.5 Ventoinha E.....	105
4.5 Considerações finais do capítulo.....	109
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	110
5.1 SÍNTESE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS E CONCLUSÕES .....	110
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	111
REFERÊNCIAS.....	112
APÊNDICE 1 - Desenvolvimento da Pesquisa.....	119
APÊNDICE 2 - Dimensionamento do túnel aerodinâmico.....	120
APÊNDICE 3 - Gráfico de resultados finais e comparativos .....	121

# 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O primeiro capítulo desta pesquisa apresenta o tema, mostrando uma visão geral do assunto, problema de pesquisa, objetivos e justificativa para a sua realização. São apresentados também a delimitação e contexto da pesquisa.

## 1.1 INTRODUÇÃO

O design de superfícies pode ser uma ferramenta decisiva na melhora do padrão de eficiência de ventoinhas de pequeno porte e de outros objetos que se movimentem com o vento. Através dessa característica foram planejadas e determinadas formas de melhorar uma ventoinha através de suas áreas de superfície.

O “Design de Superfície” tem, como atividade técnica e criativa, o objetivo de criar texturas visuais e/ou tácteis, projetadas especificamente para a constituição e o tratamento de superfícies, apresentando soluções estéticas e funcionais adequadas aos diferentes materiais e processos de fabricação artesanal e industrial (Rüthschilling, 2008).

As superfícies podem proporcionar efeitos técnicos e estéticos a um produto. As superfícies técnicas estão ligadas à área da engenharia. Conforme descrito por Halling (1985 apud Stokes 2008), Engenharia de superfície pode ser definida como o ramo da ciência que lida com os métodos para atingir os requisitos da superfície desejada e seu comportamento em serviço. Normalmente a superfície de qualquer componente não ligado à engenharia pode ser selecionado com base na textura e cor, já as superfícies técnicas devem executar funções complexas e eficazes sob várias condições.

Pelo ponto de vista estético o processo de projeção de superfícies exige alguns requisitos fundamentais, tais como: o conhecimento sobre o material a que se destina o projeto; o método de impressão ou aplicação a ser utilizado; domínio no desenvolvimento de módulos do desenho, repetições e encaixes; compreensão do processo produtivo que será empregado no desenvolvimento de tal superfície; domínio sobre as diferentes superfícies e



suas funções; noções de ergonomia; conhecimento amplo da população a que o objeto será destinado, além da atualização constante diante das questões sociais, políticas, econômicas e ambientais (ARAÚJO, CASTRO, 1984).

Desse modo, o profissional dessa área precisa exercitar seu olhar para as diferentes possibilidades criativas que podem surgir diante dele, sempre observando e registrando (com desenhos, colagens, fotografias, vídeos, entre outros) o que lhe instiga o ato de criar. Em outras palavras, o Design de Superfície efetiva-se a partir do mapeamento de todas as características que serão aplicadas a determinado revestimento através da pesquisa das melhores soluções criativas, estéticas, funcionais, econômicas, empresariais, etc. Os autores Araújo e Castro (1984) afirmam que o desenho de superfície não pode ser considerado um simples “embelezamento”, pois coloca os fatores estéticos em conformidade com os fatores econômicos e técnicos que determinam as características finais do produto. Assim, o tornam adequado ao desempenho das funções que dele se espera.

No caso das ventoinhas eletroeletrônicas, que são foco desse trabalho, a pesquisa para desenvolver produtos mais eficientes tornou-se uma atividade cada vez mais importante. Segundo Sérgio Rodrigues Bio (1996), eficiente é aquele que consegue o seu volume de produção com o menor dispêndio possível de recursos.

Megginson et al (1998) também abordam eficiência quando se minimiza o custo dos recursos usados para atingir determinado fim. Da mesma forma, se o administrador consegue maximizar os resultados com determinada quantidade de insumos, será considerado eficiente.

Com o avanço tecnológico, os produtos necessitam ser cada vez mais eficientes. Segundo Bessant e Tidd (2009), isso ocorre em decorrência de um cenário onde o custo é fator importante na decisão de investir ou não, considerando que a eficiência desse produto é o que pode elucidar ou justificar um investimento.

Este trabalho tem como objetivo propor inovação nas superfícies de ventoinhas de pequeno porte para que necessitem de menos escoamento de ar para seu funcionamento geral em relação a ventoinhas padrão (com pás lisas) e se tornem mais esteticamente agradáveis. Para justificar este objetivo através do uso de texturas e design de superfícies, usa-se como exemplo uma

bola de golfe. Os autores Rubini e Aguiar (2004) explicam que a textura da superfície também afeta o escoamento da camada limite, ou seja, uma esfera rugosa irá sofrer crise de arrasto em um número de Reynolds inferior a de uma superfície lisa. Por consequência, a rugosidade eleva o escoamento, gerando uma turbulência localizada que, por sua vez resulta numa esteira de menores dimensões, diminuindo assim o arrasto do corpo. Parece estranho que uma bola áspera ofereça menos resistência ao ar do que uma lisa, mas é exatamente o que acontece para uma determinada gama de velocidades.

Este é um trabalho de pesquisa qualitativa acadêmica em Design e Tecnologia cujo tema abordado aproxima-se da área de engenharia. Apesar de contar com algumas atividades desenvolvidas normalmente por engenheiros, esta pesquisa está inserida na área de ciências sociais aplicadas, abordando principalmente a caracterização e o desenvolvimento do projeto de produto.

Por esse motivo, busca-se tratar o tema com amplitude, sem um maior aprofundamento em uma única área. Sendo assim, esta dissertação foi estruturada em seis capítulos.

No capítulo 1 destacam-se as considerações iniciais ao tema com uma contextualização, apresentação do problema de pesquisa, a hipótese, objetivo geral e específico e as justificativas do trabalho.

No capítulo 2, encontra-se a fundamentação teórica feita através de uma pesquisa exploratória, onde foram abordadas referências recentes sobre temas que embasam esta pesquisa e estudos de produtos que funcionam de forma mais eficiente a partir de suas superfícies.

No capítulo 3, descrevem-se os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa, apresentando os ensaios no túnel aerodinâmico, assim como os métodos de análise de dados.

No capítulo 4, apresentam-se os ensaios e a comparação de resultados, detalhando o método utilizado para análise e coleta de dados. Destacam-se como anteprojeto os ensaios realizados sem as ventoinhas finais, para que se compreenda que foram a partir destes estudos preliminares que foram obtidas as superfícies modeladas nos protótipos finais. São apresentados também os resultados dos ensaios em forma de tabelas e gráficos.

No capítulo 5 forma-se a discussão dos resultados, onde se apresentam uma reflexão a respeito das superfícies propostas, com a intenção de dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

No capítulo 6 encontram-se as referências bibliográficas. Como contribuição acadêmica, o estudo procurou verificar a melhora de eficiência nas ventoinhas de menor escala, a partir deste objetivo, procurou-se uma bibliografia que fundamentasse as teorias sobre superfícies e outros assuntos que abordam as texturas como forma de atingir eficiência.

## **1.2 Problema**

A procura de melhor eficiência nos produtos é uma realidade em expansão em todo o mundo. Diante da inovação de um produto, assim como de tantas possibilidades projetuais, o problema de pesquisa aqui apresentado pode ser entendido da seguinte forma: Como a pesquisa científica com base no design de superfícies pode proporcionar uma ventoinha que necessite de menos energia para o seu funcionamento em relação às ventoinhas padrão (de pás lisas).

## **1.3 Hipótese**

Com o estudo das variáveis da pesquisa em conjunto ao design, é possível projetar uma ventoinha de pequeno porte que, através de modificações no seu tipo de superfície, apresente uma otimização no seu funcionamento em relação a uma ventoinha de pás lisas.

## **1.4 Objetivo Geral**

O objetivo geral do trabalho é construir um estudo através de parâmetros como superfícies e velocidades, em relação as rotações por minuto de uma ventoinha, desta forma encontrando eficiência em seu funcionamento, a partir do tratamento em suas pás.

## **1.5 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são apresentados a seguir:

- a) Identificar quais superfícies apresentarão maior eficiência quando utilizadas em pás de ventoinhas.
- b) Propor soluções através de superfícies que sejam importantes na fabricação de produtos semelhantes a ventoinhas para torná-los mais eficientes.
- c) Comparar a eficiência do produto a partir da aplicação de superfícies que se caracterizem como mais adequadas. O desafio estará em perceber se as mesmas apresentarão maior ou menor eficiência em seus funcionamentos em relação a uma ventoinha padrão (superfície lisa).

## 1.6 Delimitação do Tema

Esta pesquisa qualitativa utilizou método comparativo no decorrer dos ensaios e se delimitou a medição de eficiência a partir de parâmetros como a velocidade do escoamento de ar, tensão controlada e rotações por minuto de cada ventoinha com sua respectiva textura. O resultado se refere à diminuição ou aumento (impedância) do escoamento de ar necessário para a partida inicial da ventoinha, ou seja, momento em que ela deixa de estar em repouso e inicia seu ciclo.

## 1.7 Justificativa

Esta pesquisa pretende contribuir para a inovação de produtos que utilizem o vento como determinante de funcionamento e ou geração de energia. Este estudo contribuirá para que, depois de testadas as superfícies nas pás, possa-se gerar outras superfícies que auxiliem na eficiência de produtos de diferente escala em relação ao modelo estudado através da teoria da semelhança.

É evidente que para a utilização dessa teoria deva existir uma correlação entre as dimensões do modelo e do protótipo. É justamente isso que define Motta (1972, p. 19, grifo do autor), quando afirma que "**Modelos geometricamente semelhantes** são aqueles cuja geometria é determinada pela redução, segundo um mesmo fator, de todas as características

geométricas do protótipo", ou seja, a razão entre a altura e comprimento de um objeto, por exemplo, deve ser constante no modelo e no protótipo.

Ao passo que se desenvolvem pesquisas para ventoinhas, aumenta a probabilidade destas empresas se tornarem mais competitivas e desenvolverem produtos mais eficientes do que as tradicionais ventoinhas com pás lisas. Segundo Jureczko et al (2005 apud Pires 2010), o custo de fabricação das pás de um rotor está na ordem de 15 a 20% do custo total de produção da ventoinha.

Segundo Brasil (2007), ao analisar a diversidade de atividades realizadas pelo homem, nota-se que o uso da energia se faz presente em quase sua totalidade. Métodos para extração e conversão de energia foram criados ao longo da história. Com as fontes tradicionais de energia tendendo ao esgotamento e com a crescente agressão ao meio ambiente por parte da queima de combustíveis fósseis, ganharam maior expressão as fontes alternativas de geração de energia.

Existe um grande crescimento de investimentos no setor de energias alternativas no Brasil, a competitividade é um dos fatores que determinam o nível de produtividade de um país (BRASIL, 2007). Neste cenário, a inovação de projetos pode contribuir para o reforço da importância da pesquisa em design, fazendo com que empresas invistam e busquem soluções criativas para desenvolver produtos mais eficientes e que se utilizem cada vez mais de energia limpa e sustentável ou que ao menos leve em conta a diminuição do consumo energético.

## **1.8 Contexto da Pesquisa**

A pesquisa passou por três etapas. A primeira etapa foi a escolha do modelo de ventoinha que foi definida como padrão para ser escaneada e dar origem aos protótipos. A seguir, como mostra a figura 1, observa-se a peça sendo escaneada em 3D e posteriormente modelada no computador utilizando o programa Geomagic, que dá todo o suporte a digitalização.

Figura 1 - Digitalização 3D e o resultado modelado em software 3D.

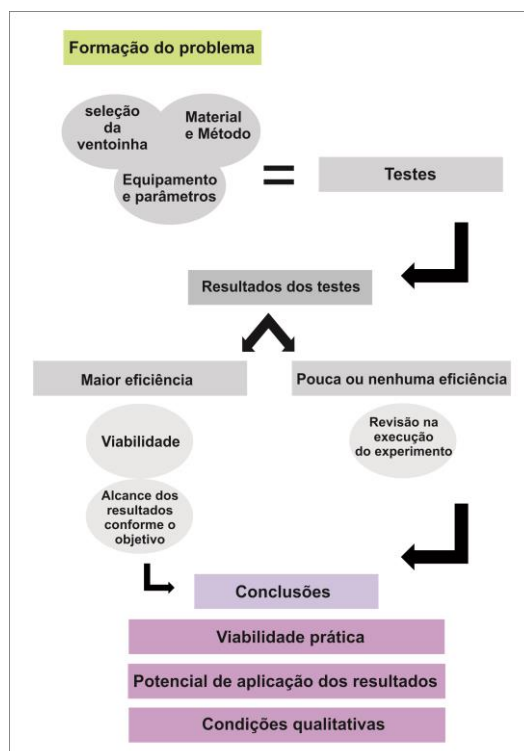


Na segunda etapa, foram realizados ensaios com diferentes superfícies aplicadas às pás. A fim de fazer uma avaliação preliminar de desempenho entre as texturas e à superfície lisa, foi utilizada massa de modelar para criar alguns relevos.

Na terceira etapa, tendo sido definidas as superfícies mais eficientes a partir do resultado dos ensaios feitos com massa de modelar, as texturas escolhidas foram prototipadas, dando origem aos modelos do trabalho.

Estas etapas servem de base para a pesquisa e verificação dos resultados que foram obtidos. Estão detalhadas no fluxograma da figura 2 que podem ser visualizados no apêndice 1.

Figura 2 - Pesquisa em Desenvolvimento.



Este trabalho foi finalizado com seu objetivo atingido, de identificar uma maior eficiência entre os modelos de textura utilizados.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

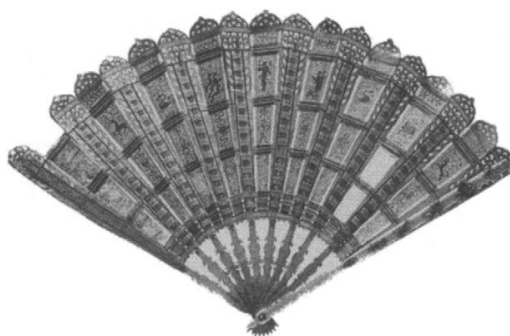
### 2.1 Ventoinhas

O uso de ventiladores foi estabelecido nas primeiras civilizações egípcias. No Museu Britânico, aonde encontram-se objetos (pinturas, painéis, quadros) que retratam as mulheres com leques de penas. Outras evidências podem ser vistas no Museu do Cairo, como por exemplo, o leque de Amenhotep.

As dinastias antigas consideravam os leques como sendo um dos seus acessórios necessários. Ao longo dos séculos os produtos que se assemelhavam a ventiladores continuaram a ser bastante requisitados e importantes na vida civilizada.

De acordo com Cory (2005), os primeiros leque utilizados foram principalmente os de mão, por mulheres, para dar movimento ao ar, com finalidade de arrefecimento do rosto. Originalmente, eles eram todos do tipo fixo como na figura 3, feito de penas, pano ou de papel esticado em um quadro de bambu. Posteriormente, muitos foram feitos de penas de avestruz, tafetá, seda ou rendas finas montadas em marfim, bem como de madre-pérola e metais preciosos. No Museu Victoria and Albert e no Museu Kensington, em Londres, há um grande número de leques Franceses, ingleses, alemães, italianos e espanhóis.

Figura 3 - Um exemplo de leque do século 18.

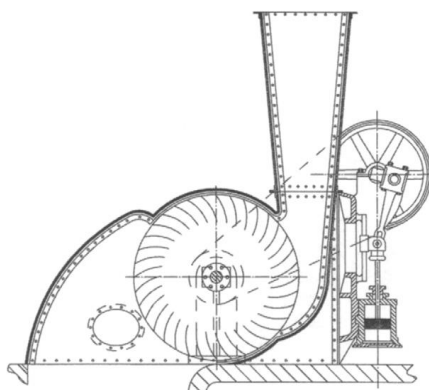


Fonte: Cory, 2005

Gradualmente, os leques se tornaram um recurso aceito da vida social na Europa e começaram a evoluir. De Roma, os leques se espalharam para outros países e já não eram fabricados exclusivamente para o propósito original de abanar o rosto.

Depois de uma considerável evolução no sistema de arrefecimento, é relevante citar que o Mortier diametral Fan foi talvez o primeiro ventilador tangencial ou de fluxo cruzado. Foi fabricado por Louis Galland em Chalon - sur- Saone, na França. Eficiências superiores a 70% foram indicados por Charles Innes, em seu livro *The Fan* (1916). Esse foi um dos grandes avanços na história das ventoinhas, segundo Cory (2005). A descoberta aparece indicada na Figura 4.

Figura 4 - O ventilador diametral Mortier - talvez o primeiro tangencial ou ventilador de fluxo cruzado.



Fonte: Cory, 2005

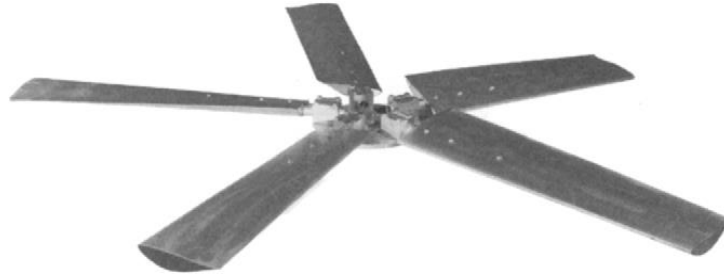
Ventiladores axiais de baixa pressão, como ilustra a figura 5 foram criados como um tipo especial de ventilador, sendo o rotor situado num orifício de parede ou divisória. Segundo Cory (2005), os ventiladores são simples unidades de baixo custo com impulsores de pás largas geralmente formadas a partir de chapa metálica. As lâminas são moldadas para funcionar com um padrão de fluxo, desviando o ar com a mínima formação de vórtices<sup>1</sup>. O uso de técnicas de visualização do escoamento, por exemplo, a partir da injeção de fumaça posicionada, lançada a partir do rotor é muito importante no processo

<sup>1</sup> Vórtices são regiões do campo onde elementos fluidos fazem rápida e local circulação, formando-se e destruindo-se continuamente (ARAÚJO, 2013).



de identificação de vorticidades. A forma da lâmina é normalmente curva e desenvolvida para as diferenças de pressão, como se observa na figura 5.

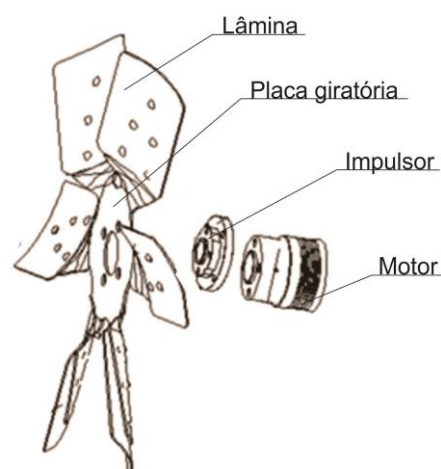
Figura 5 - Ventilador axial de baixa pressão (doméstico).



Fonte: Cory, 2005

Uma ventoinha é formada por um conjunto de peças sólidas feitas para permitir uma quantidade de giro considerada ótima. A transferência de giro é feita por um eixo, em alguns casos, aumentada com auxílio de um conjunto de engrenagens. As pás que fazem parte desse conjunto de peças, como ilustra a Figura 6, são os elementos que entram em contato direto com a massa de ar em movimento. O momento de interação das pás com o escoamento de ar se dá quando é transferida energia cinética do fluxo para superfície da pá. Os desenhos para as superfícies ou projetos das pás são feitos com objetivo de maximizar essa transferência de energia.

Figura 6 - Partes do rotor aerodinâmico.



Fonte: Cory, 2005

Diversas variáveis estão presentes quando se determina uma geometria onde se pretende obter comportamento controlado em contato com um fluido. Segundo Burton et al (2001), para se obter um desenho eficiente, alguns objetivos devem ser satisfeitos:

- a) Maximizar a produção de energia para uma distribuição específica de escoamento de ar;
- b) Procurar o limite de potência máxima;
- c) Resistência às cargas mecânicas inerentes ao objeto e à possível fadiga que ocorrerá;
- d) Restringir a tendência de movimento da ponta da pá em direção à torre;
- e) Evitar ressonâncias;
- f) Minimizar peso e custo.

O projeto das pás do rotor, bem como de suas superfícies, deve levar em conta dois aspectos: aerodinâmico e estrutural. Dentro do aspecto aerodinâmico, podem-se listar algumas fases do processo de projeto:

- a) Definição do diâmetro do rotor;
- b) Definição da geometria do perfil aerodinâmico;
- c) Definição dos parâmetros aerodinâmicos (ângulo de passo, velocidades);
- d) Definição da geometria do perfil longitudinal da pá (corda e *twist*).

Segundo Pires (2011), os perfis aerodinâmicos mais comumente utilizados para asas de aeronaves e para pás de ventoinhas são os do tipo NACA (National Advisory Committee for aeronautics ou Comitê Nacional para Aconselhamentos sobre Aeronáutica). Perfis NACA são desenvolvidos por uma série de relações geométricas intrínsecas ao perfil. Normalmente os perfis NACA são identificados por algarismos que representam suas relações geométricas e não possuem especificações sobre texturas de superfícies.

Nesta pesquisa foram adquiridos dados experimentais, pois os modelos desenvolvidos são texturizados especificamente para os ensaios no túnel aerodinâmico, lembrando que a formas das ventoinhas desta pesquisa não

foram criadas e sim tiveram apenas as superfícies das pás modificadas sobre a pá modelo, desta forma, tendo como base geral um modelo já existente no mercado.

## **2.2 Design de superfícies, Texturas e Topologia**

De acordo com Silva (2006), a palavra superfície vem do latim *super* (superior) + *facies* (face) e etimologicamente significa face ou parte exterior dos corpos. De acordo com Silva (2006), usualmente, uma superfície pode ser definida como a parte externa de um corpo, também representando ideia de face, aparência e aspecto; e, geometricamente, como uma configuração geométrica de duas dimensões.

O termo “Design de Superfície”, apesar de etimologicamente interessante para expressar o desenvolvimento de superfícies baseadas na relação produto-usuário, vem sendo empregado geralmente resumindo-se à área gráfica artística.

Segundo Rüttschilling (2006), o termo inglês “Surface Design” normalmente é traduzido como “Design Têxtil” ou “Desenho (Industrial) de Estamparia”, denominações usadas no Brasil que se referem somente ao campo têxtil e de impressão de desenhos sobre tecidos. A autora propõe uma definição mais abrangente para o termo: “consiste na criação de imagens bidimensionais, projetadas especificamente para geração de padrões, que desenvolvem-se de maneira contínua sobre superfícies de revestimentos”.

Textura pode ser definida como um aspecto da superfície associado ao toque; o tato ou forma de uma superfície ou substância; suavidade, rugosidade, etc. de algo [Wikcionário, 2006] apud Silva (2006). Para a Enciclopédia Wikipédia (2006) apud Silva (2006), textura refere-se às propriedades de tocar e sensações causadas por superfícies externas de objetos através do sentido do tato. O termo textura também pode ser utilizado para descrever sensações não-táteis. Texturas ainda podem ser consideradas como um padrão em pequena escala onde o elemento individual que formará o todo não é distinguível.

Segundo Silva (2006), matematicamente (topologia), uma superfície é um espaço bidimensional e, em um espaço tridimensional, as superfícies

podem representar os limites de objetos sólidos tridimensionais. Na geometria euclidiana, de acordo com Silva (2005), o ponto é o elemento básico, que não tem partes e que não tem grandeza alguma; linha é o que tem comprimento e não tem largura ou espessura (uma dimensão), sendo suas extremidades pontos; superfície é o elemento que tem comprimento e largura (duas dimensões), sendo suas extremidades linhas; e sólido é o que tem comprimento, largura e espessura (três dimensões), sendo suas extremidades superfícies.

Para Wong (1998), o desenho de uma superfície se refere à criação de um mundo bidimensional por meio de esforços conscientes de organização dos vários elementos. Essa representação inclui duas dimensões, comprimento e largura, que em conjunto estabelecem uma superfície plana, sem profundidade. Já a representação tridimensional mostra as formas e materiais tangíveis no espaço real, possibilitando informações para percepção humana que levam a uma compreensão completa da realidade do produto. Para Silva (2006), cabe salientar que o material é o veículo no qual a textura e suas inerentes percepções se manifestam.

Manzini (1989) define a textura superficial como a “pele do objeto”, capaz de transmitir diferentes sensações e percepções aos usuários. A aplicação de texturas, por alterar características superficiais do material, veículo através do qual a textura se manifesta, influencia também no desempenho dos produtos quando em uso.

O autor Silva (2006) destaca que antes de discutir as texturas e suas aplicações, tanto no Design quanto na Engenharia de Superfícies, faz-se necessária a apresentação de alguns conceitos importantes, a fim de fornecer subsídios para o melhor entendimento das discussões realizadas ao longo do trabalho. Para o PBD (Programa Brasileiro do Design), Design de Superfície é o ramo do design gráfico voltado à criação de grafismos, ilustrações ou outros tipos de composições para aplicação em diferentes tipos de superfícies. Destacam-se as usadas no revestimento de paredes, pisos ou calçadas, como pastilhas, azulejos, lajotas, papéis, tecidos, carpetes, divisórias, etc.

Discussões em torno da definição de Design de Superfícies vêm ocorrendo e no que diz respeito às texturas, considera-se que elas podem ser somente visuais (bidimensionais) ou também táteis, apresentando leve relevo.

No que diz respeito à geração de padrões em relevo e a composições através de elementos tridimensionais, aplicáveis ao design de produtos, o termo “textura” precisa ser melhor compreendido (SILVA, 2006).

Considerando as intenções para com o design através das texturas nesta pesquisa é relevante trazer o conceito segundo o International Council Design of Societies of Industrial Design - ICSID (2006): Design é uma atividade criativa que visa estabelecer qualidades multifuncionais para objetos, processos, serviços e seus sistemas durante todo o ciclo de vida.

### **2.3 Texturas do ponto de vista estético**

No que diz respeito à interação do produto com o usuário, as texturas mostram papel estético fundamental, visto que a texturização de superfícies influencia na percepção de um usuário ao vê-la e/ou tocá-la. De acordo com Kunzler (2003), as diferenças na percepção tátil devem considerar as variáveis de rugosidade (aspereza), a dureza e a condutividade térmica do material.

Estas são as três características associadas ao material que são percebidas ao tocar em um objeto e juntas podem identificar por completo um relevo. Para Ruiz (1994) apud Silva (2006), a textura pode ser apreciada mediante o sentido do tato ou da visão, ou através de ambos. Cada material possui uma textura diferente segundo sua natureza, orgânica ou inorgânica, segundo sua composição física e segundo os processos de fabricação a que foi submetido.

Para os autores Evans e Bryan (1999), o uso das texturas pode ser estendido a muitos e distintos produtos. A texturização permite a junção sutil das peças cobrindo diversas imperfeições do processo industrial, por exemplo. As texturas influenciam também o comportamento dos produtos quando em uso.

Tecnicamente, a textura de uma superfície costuma ser associada à rugosidade superficial e pesquisadores de diferentes áreas vêm estudando sua influência no desempenho dos produtos industriais, como no caso desta pesquisa. Euitiz (2002) Apud Silva (2006) afirma que o acabamento final e a textura de uma superfície são de grande importância e influência para definir a capacidade de desgaste, lubrificação, resistência à fadiga e aspecto externo de

uma peça ou material e que, por isso, a rugosidade é um fator que deve ser levado em consideração. As superfícies podem ser projetadas com texturas específicas para prover determinada função a um produto. Stout (1999), classifica as superfícies funcionais em Superfícies de Engenharia (Engineered surfaces) e Superfícies Estruturadas (Structured surfaces).

Para Silva (2006), as emoções advindas das texturas não devem ser vistas como uma consequência, mas como algo que o designer deve constantemente procurar; algo que deve vir antes mesmo do projeto, o que também não significa que a funcionalidade está em segundo lugar. Neste sentido, Norman (2002) indica claramente que um bom projeto ocorre quando beleza e usabilidade estão em balanço. Segundo Dischinger (2006), a consciência desta interação do produto com emoções e o efeito que produzirá no usuário é essencial no desenvolvimento de um produto.

Nos esclarecimentos de Silva (2008), sobre as texturas ele afirma que a primeira impressão de um produto é associada na maior parte à superfície do material, que é a interface (pele do produto) entre o usuário e o objeto e também é o lugar onde acontece materialmente parte da passagem de informações. A ligação entre o produto e a emoção pode ser estabelecida e intensificada com o uso da textura, que é uma ferramenta que sustenta o design emocionalmente dirigido. O relevo pode influenciar a ambos sentidos: o visual e o tátil. O sentido do toque, aquele que a pele reserva para ser percebido sobre todo o corpo, está conectado não somente aos instintos de proteção e segurança, mas também a outros sentimentos primários presentes desde os primeiros momentos no mundo exterior.

Segundo Ackerman (1996), o tato é o sentido prioritário a uma necessária condição interpretativa dos objetos, tornando-se essencial à vida humana. Neste ambiente Segundo Linden e Kunzler (2002) Apud Silva (2005), a seleção dos materiais a serem utilizados nos produtos industriais é um dos fatores determinantes para a sua qualidade e para o seu sucesso. Não apenas influencia o seu desempenho técnico, como seguramente é um dos fatores que afetam o consumidor/usuário na sua decisão, frequentemente subjetiva, ao adquirir um determinado produto.

A dimensão subjetiva está associada a fatores como cultura, gostos e experiências individuais (muitas vezes não conscientes), valores, preconceitos,

etc. Esse conjunto de fatores corresponde ao que Löbach (1981) Apud Silva (2006) classificou como funções estética e simbólica, complementares à função prática do produto, e ao que Bürdek (1994) Apud Silva (2006) considerou como a função de linguagem do produto. Recentemente, a Semântica de Produtos tem-se dedicado a investigar os significados que as pessoas atribuem aos produtos, a partir do seguinte axioma "o ser humano não responde às qualidades físicas das coisas, mas ao que elas significam para ele" (Krippendorff, 2000). A textura pode ou não conter padrões de repetição, mas independentemente disso, pode representar símbolos em relevo ou em sinais gráficos (signos) para comunicação com os usuários do produto. Segundo Santaella (2002), essa interpretação diz a respeito da Semiótica como uma primeira percepção carregada pela pregnância visual dos objetos ou materiais, provocando uma ligação entre uma indicação racional, que o signo se refere ou representa, ao efeito que o signo irá provocar em um possível intérprete. Assim, a utilização de signos nas texturas mostra-se uma alternativa bastante interessante para transmitir informações através da interface material x usuário.

## **2.4 Texturas do ponto de vista econômico**

De acordo com a abordagem de Silva (2006) fabricar consiste basicamente em alterar uma matéria-prima com o intuito de obter um produto acabado. Segundo Kalpakjian (1985), os processos de fabricação representavam, nos países industrializados, um terço do produto interno bruto. Sendo a rugosidade consequência direta da fabricação, sua aplicação pode ter importante papel econômico. A texturização seja ela funcional, estética, ou estético-funcional, também corresponde ao acabamento superficial e, neste sentido, também tem importante papel econômico. O papel econômico da textura pode assumir duas faces, uma de aumentar o custo de fabricação e outra de aumentar o valor agregado ao produto.

## **2.5 Normas que estabelecem definições e procedimentos para a medição de superfícies.**

Para a determinação de parâmetros quantitativos de rugosidade, existem normas que estabelecem definições e procedimentos para a medição

de superfícies. Segundo Pessoa (2001) Apud Silva (2006), a International Organization for Standardization (ISO) é uma organização, sediada em Genebra (Suíça), reconhecida e aceita internacionalmente no estabelecimento de normas técnicas desenvolvidas e avaliadas no âmbito de competência de suas delegações nacionais. O Instituto Brasileiro de Normas Técnicas (INMETRO) representa o Comitê Brasileiro de Certificação (CBC) na ISO e, assim possui, além das responsabilidades atribuídas a seus membros, a de divulgar, avaliar e preservar a aceitação, o uso e integridade da marca ISO. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o organismo de certificação brasileiro, credenciado pelo INMETRO, para atuação em certificação de sistemas de garantia de qualidade no país e também de produtos.

Silva (2006) explica que em 1995 a ISO implementou as Especificações Geométricas do Produto (GPS) e lançou um Relatório visando prover informações para orientar o uso destas normas. O Relatório Técnico ISO/TR 14638:1995, intitulado Geometrical product specification (GPS) – Masterplan, proporciona uma visão geral da normalização internacional de Especificações Geométricas do Produto, explicando o conceito de GPS e fornecendo um planejamento incluindo normas existentes e futuras. Durakbasa (2001) Apud Silva (2006) explica que as Especificações Geométricas do Produto são baseadas em regras e métodos matemáticos, consideração da macro e micro geometria, possibilidade de mensurar quantidades e especialmente tolerâncias, avaliação da incerteza, etc. Bennich (2003) traz uma definição mais completa: “as normas no campo das Especificações Geométricas do Produto são referentes a especificações de macro e micro geometria abrangendo a tolerância dimensional e geométrica, propriedades da superfície e os princípios de verificação relacionados, equipamentos de medição e requisitos de calibração incluindo a incerteza das medidas

## **2.6 Número de Reynolds (Re)**

O número de Reynolds, segundo Çengel (2006), Fox e McDonald (2006), White, (2003) apud Pereira (2010), é um parâmetro adimensional que correlaciona os comportamentos inercial e viscoso num escoamento. Um



número de Reynolds muito baixo indica um movimento essencialmente laminar onde os efeitos de inércia são desprezíveis e um número de Reynolds elevado é típico de escoamentos dominados pelas forças de inércia. Além disso, estes escoamentos a elevado número de Reynolds decorrem frequentemente em regime turbulento onde apresentam uma variação lenta no tempo médio, mas, que por sua vez, possui fortes flutuações aleatórias de alta frequência. O número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} D}{\mu}$$

$U_{\infty}$  - velocidade média do fluido ao longe (não perturbado)

D –longitude característica do fluxo, o diâmetro para o fluxo no tubo.

$\mu$  – viscosidade dinâmica do fluido

$\rho$  – massa volúmica do fluido

## 2.7 Coeficiente de Arrasto (CD)

Segundo Pereira (2010),o Coeficiente de arrasto é um parâmetro de força adimensional, usado para quantificar a resistência de um objeto à passagem de um fluido. Está relacionado com a força de arrasto, que, por definição, é a componente da força paralela à direção do escoamento. O valor de CD não é constante, pois ao adimensionalizar depende do número de Reynolds e de outras grandezas adimensionais geométricas. A fórmula é dada

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 A}$$

da seguinte forma:

$U_{\infty}$  - velocidade média do fluido

$F_D$  – força de arrasto

A – área de referência

$\rho$  – massa volúmica do fluido

$$C_D = f(Re)$$

## 2.8 Coeficiente de Sustentação (CL)

Segundo Çengel (2006), Fox (2006), White, (2003), é um coeficiente adimensional que relaciona a sustentação de um corpo, a pressão dinâmica do fluxo de fluido em torno do corpo e uma área de referência associada ao corpo. Está relacionado com a força de sustentação, que por definição, é a componente da força perpendicular à direção do escoamento. A equação representa o coeficiente de sustentação:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A}$$

Sendo,

$U_\infty$ - velocidade média do fluido (ao longe)

$F_L$  – força de sustentação

$A$  – área de referência

$\rho$  – massa volúmica do fluido

Para o caso de aerofólios os coeficientes de arrasto e de sustentação são funções do número de Reynolds e do ângulo de ataque,  $\alpha$ , que é o ângulo formado entre a corda do aerofólio e o vetor velocidade,  $U$ , da corrente livre. A corda é o segmento de reta que passa pela linha de espessura média entre o bordo de ataque e o de fuga de um aerofólio. Quando este tem secção simétrica, tanto a linha média quanto as cordas são retas e coincidem. A área perpendicular ao escoamento muda com o ângulo de ataque, como consequência disso, a área planiforme,  $A_p$ , é usada para definir os coeficientes de arrasto e de sustentação.

## 2.9 Coeficiente de Pressão (CP)

De acordo com ÇENGEL (2006), FOX (2006), WHITE, (2003), o coeficiente de pressão é um número adimensional que descreve as pressões relativas ao longo de um campo de fluxo. Cada ponto num campo de fluxo de fluido tem o seu próprio coeficiente de pressão,  $C_p$ . Como se observa na equação:

$$C_p = \frac{P_x - P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2}$$

Sendo,

$U_\infty$  - velocidade média do fluido

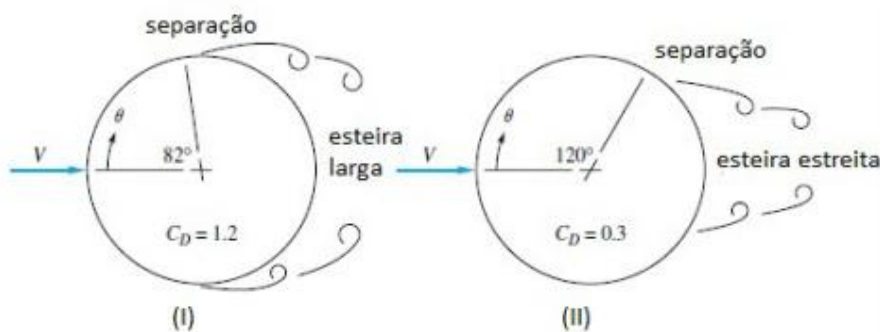
$P$  - pressão medida a jusante

$P_\infty$  – pressão medida a montante

$\rho$  – massa volúmica do fluido

Os fenômenos de deslocamento, formação da esteira e o caminho de vórtices estão normalmente associados ao aparecimento de um gradiente positivo de pressões junto à parede do obstáculo (gradiente de pressão adverso), correspondente ao escoamento exterior à camada limite. Ora, quanto maior for a curvatura das paredes, maior será o gradiente de pressões e portanto mais intensos todos aqueles fenômenos, como observamos na figura 7.

Figura 7 - Crise do arrasto.



Fonte: Pereira, (2010).

## 2.10 Camada Limite

O conceito de camada limite foi formulado primeiramente por Ludwig Prandtl (1904). Para ÇENGEL (2006), FOX (2006), WHITE, (2003) as dificuldades matemáticas para a sua solução proibiam um tratamento teórico dos escoamentos viscosos. Uma das grandes conquistas da teoria da camada limite foi a capacidade de prever que muitos escoamentos viscosos podem ser analisados dividindo-se o fluxo em duas regiões: uma perto das fronteiras

sólidas, e a outra cobrindo o restante. Somente na estreita região junto a uma fronteira sólida, camada limite, o efeito da viscosidade é importante, porque na região fora da camada limite, o efeito da viscosidade é desprezível e o fluido se comporta como não viscoso. Infelizmente, ainda hoje a teoria não pode prever com precisão o comportamento da região de fluxos separados e a sua interação com a camada exterior. Na camada limite, tanto as forças viscosas quanto as de inércia são importantes, logo o número de Reynolds pode ser significativo na caracterização dos escoamentos em camada limite.

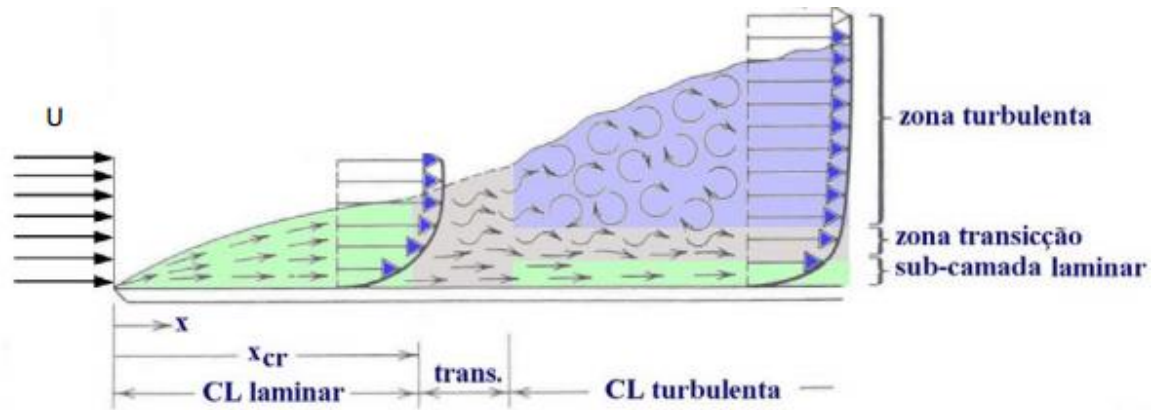
## **2.11 Escoamentos Laminar e Turbulento**

O escoamento em camada limite pode ser laminar ou turbulento antes da esfera para Libby (1996) e Pope (2003), não existindo um valor de referência absolutamente correto de número de Reynolds para o qual ocorre a transição de regime laminar para turbulento, na camada limite. Entre os fatores que afetam a transição em camada limite encontram-se o gradiente de pressão, a rugosidade superficial, a transferência de calor, as forças do corpo e as perturbações da corrente livre.

Em muitas situações reais, uma camada limite se desenvolve sobre uma superfície longa, essencialmente plana, e como, as características básicas de todos esses escoamentos são ilustradas pelo caso mais simples de uma placa plana.

A Figura 8 exibe um quadro qualitativo do crescimento da camada limite sobre uma placa plana. A camada limite é laminar por uma curta distância antes da borda de ataque, ocorrendo à transição sobre uma região da placa, em vez de ser sobre uma linha transversal à placa. A região de transição se estende até ao local onde o escoamento em camada limite se torna inteiramente turbulento.

Figura 8 - Esquema de escoamentos.



Fonte: Pereira, (2010).

## 2.12 Ventoinhas Texturizadas

Observando como estes conceitos vistos até então nesta pesquisa funcionam no mercado ou em estudos práticos, foi selecionado como exemplo o caso da ventoinha Silent Eagle. A Sharkoon é um fabricante de jogos e soluções de armazenamento de dados, especialmente no mercado de TI alemão. Em 2004, a fábrica expandiu sua linha de produtos e agora fabrica *coolers* e fontes de alimentação, ventiladores, placas de rede, dispositivos de entrada e de multimídia.

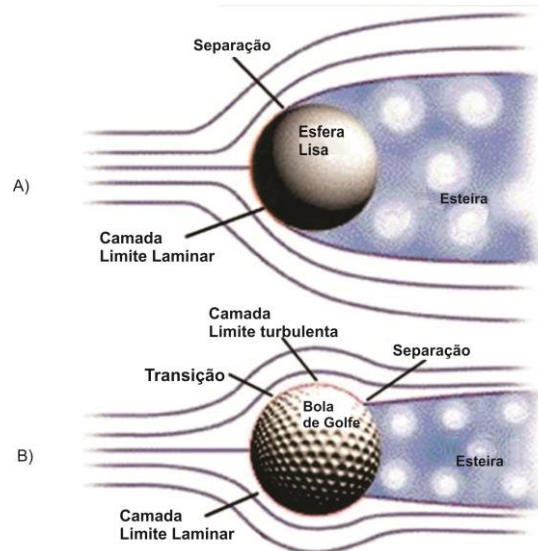
De um modo geral, todas as soluções de refrigeração no mercado são muito semelhantes, assim como o desempenho dos *coolers*. Por exemplo, normalmente qualquer ventilador de 80 mm poderá realizar aproximadamente o mesmo trabalho com mesma eficiência em relação a outro ventilador de 80 mm se a sua velocidade for correspondente. A fábrica da Sharkoon acreditou ter criado um produto que desafiou esta afirmação.

Lembrando-se do jogo de golfe, a bola utilizada inicialmente era esférica e lisa, os praticantes do esporte observaram que durante o jogo, quando lançada no ar, a direção da bola era difícil de controlar. O problema estava na própria bola. A superfície lisa propiciava alta resistência do ar, bastando uma rajada de vento para mudar a bola de direção (SHARKOON, 2013).

Muitas foram as tentativas de reduzir a resistência do ar da bola de golfe, finalmente se obteve sucesso quando foi introduzida uma superfície de pequenas depressões esféricas na bola. Como se observa na Figura 9, o ar foi retido nos poços criando uma camada turbulenta sobre a superfície da bola

proporcionando um escoamento com menor separação, reduzindo o arrasto de pressão, mas também aumentando o arrasto de atrito em torno da esfera, de forma a reduzir o arrasto total.

Figura 9 - Separação da camada limite em uma esfera; (a) laminar e (b) turbulenta.



Fonte: Sharkoon 2013

O mesmo tipo de textura da bola de golfe, foi reproduzida na ventoinha, como ilustra a figura 10. Acredita-se que proporcionando uma superfície de fluxo de ar mais eficiente é possível tornar o ventilador mais eficaz a baixas velocidades de rotação. Por consequência a operação se tornou mais silenciosa e com arrefecimento otimizado. (SHARKOON, 2013).

Figura 10 - Silent Eagle 2000.



Fonte: Sharkoon 2013

ASILENT EAGLE 2000, apresentada na figura 10, possui uma carcaça preta com cantos arredondados ao redor da ventoinha, que torna o

escoamento de ar mais suave e 4 parafusos de borracha que podem ser usados para ajudar a absorver a vibração e também colaboram na eficiência do produto. Em suma, estas são as principais características da Sharkoon Silent Eagle 2000. Este modelo de ventoinha texturizada possui:

- a) Lâmina de rotor original e design do quadro
- b) Mancal de metal Robusto
- c) Proteção do cabo de tecido emborrachado (revestimento)
- d) Cabo de conexão Universal (4 pinos, mais linha de sinal separado para o monitoramento da velocidade do ventilador)

A ficha técnica do produto é apresentada na Tabela 1.

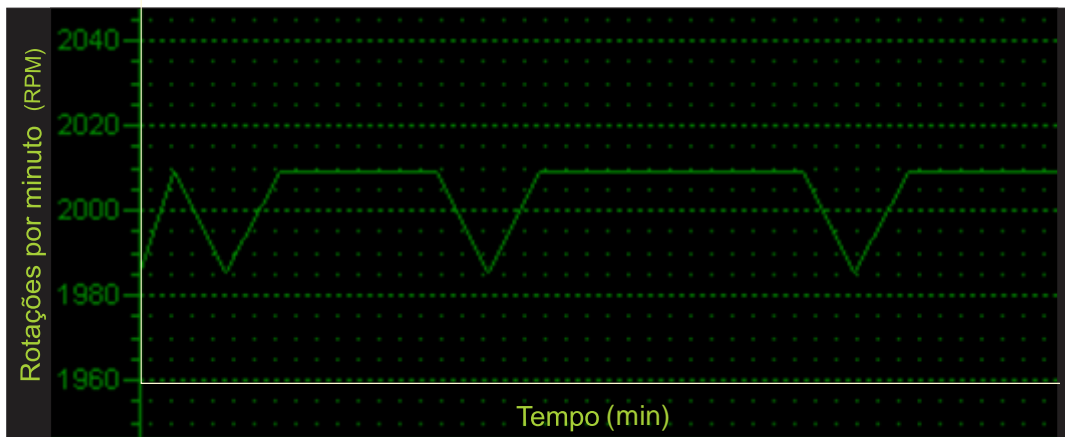
Tabela 1- Especificações detalhadas, tal como previsto pela Sharkoon.

<b>Nome do produto</b>	<b>SILENT EAGLE 2000</b>
<b>Tensão</b>	12 V (DC)
<b>Consumo</b>	1.44 W
<b>Rotação por minuto</b>	2000 rpm
<b>Fluxo de ar</b>	22.7 CFM
<b>Nível de ruído</b>	17.8 dB(A)
<b>Dimensão (mm)</b>	80 x 80 x 25
<b>Conector</b>	Universal

Fonte: Sharkoon 2013.

A empresa Sharkoon, focada em provar a eficácia da ventoinha texturizada Silent Eagle, realizou uma comparação entre a ventoinha Silent Eagle e uma das mais recentes criações com pás lisas da fábrica. O experimento realizado coloca em prova o potencial de arrefecimento de uma CPU pela Silent Eagle2000em relação a ventoinha com pás lisas. Conforme o gráfico 1, na realização do teste não foi aumentada ou diminuída a velocidade de rotação em relação ao tempo, de modo que os ventiladores estiveram fixados na velocidade de 2000 rpm.

Gráfico 1 - Velocidade de rotação produzido pelo Silent Eagle 2000.



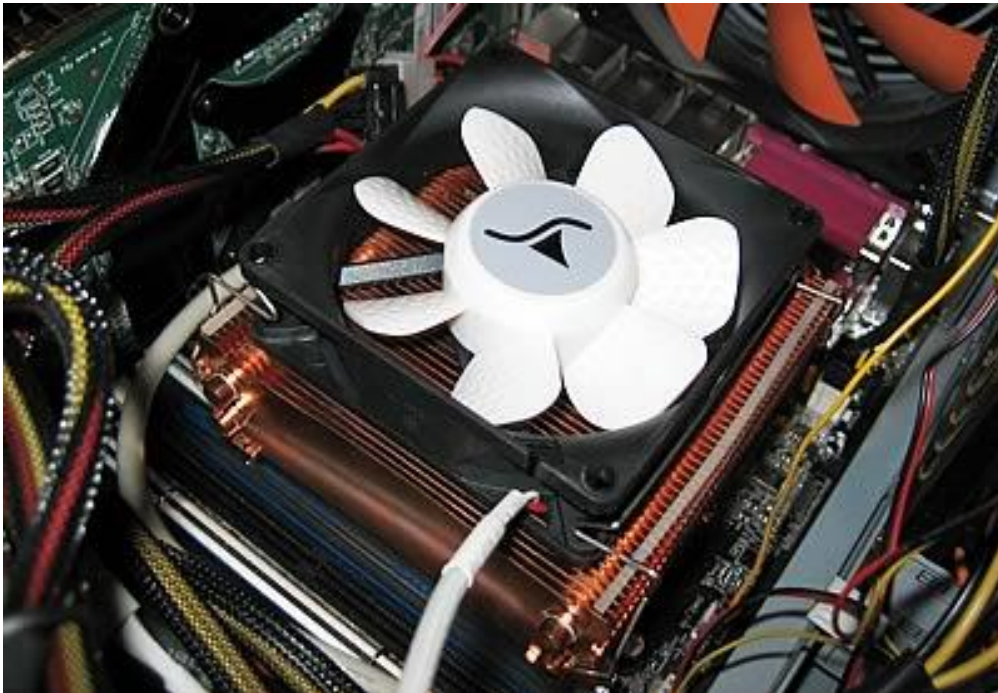
Fonte: Sharkoon, 2013.

O teste foi realizado utilizando um sistema de refrigeração (cooler) com base de cobre (sem ventoinha), posteriormente, foi instalada uma ventoinha (Speed Fan) normal sem textura com velocidade de rotação controlada constante de 2000 rpm. Em seguida, mediu-se a temperatura na CPU com o arrefecimento da Speed Fan (ventoinha lisa).

Após o experimento inicial, deixou-se que o sistema esfriasse por cerca de uma hora e, em seguida, instalou-se o Sharkoon Silent Eagle 2000 (ventoinha texturizada), medindo-se novamente a temperatura da CPU, conforme ilustra a figura 11.



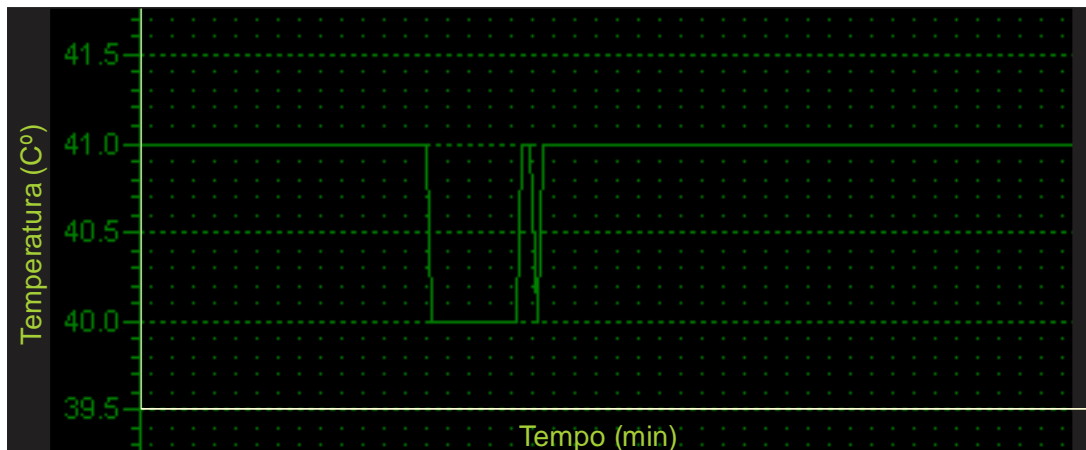
Figura 11 - Medição da temperatura da CPU.



Fonte: Sharkoon 2013

Como pode-se observar na figura 2,a ventoinha normal lisa Speed Fan apontou 41°C como temperatura da CPU com velocidade de 2000 rpm .

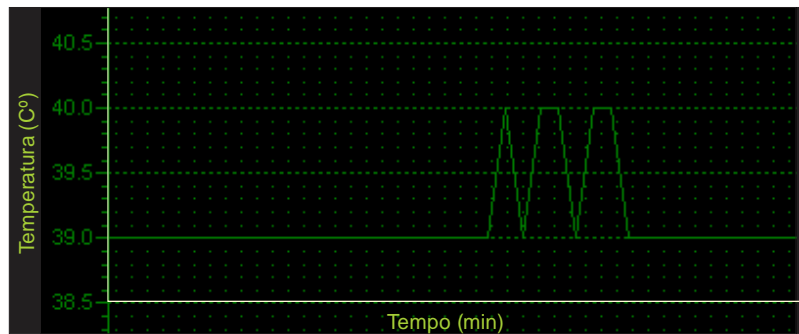
Gráfico 2 - Ventoinha normal (lisa) - 2000RPM.



Fonte: Sharkoon 2013

Ao comparar os gráficos 2 e 3, observa-se que a ventoinha texturizada Silent Eagle apontou 39°C de temperatura da CPU na mesma velocidade de rotação que o modelo Speed Fan.

Gráfico3 - Sharkoon Silent Eagle (Texturizada) - 2000RPM.



Fonte: Sharkoon 2013

A medida de 2°C é uma diferença pouco expressiva, mas é, no entanto uma diferença que comprova a eficiência através da textura aplicada na Silent Eagle 2000.

Nesse contexto, a queda de temperatura é significativa, inclusive porque a ventoinha tem rotação de 2000 rpm, velocidade considerada média pela fábrica.

### **2.13 Influência do estudo no corpo do Falcão Peregrino para elaboração de uma das superfícies**

Durante o projeto de superfícies para as pás da ventoinha foi utilizado também como base um estudo baseado na aerodinâmica do pássaro falcão peregrino, o estudo investiga a aerodinâmica do falcão (*Falco peregrinus*) durante o mergulho. Os Falcões peregrinos podem atingir velocidades de mais de 320km/h. O estudo, cada falcão foi treinado para mergulhar na frente de uma barragem vertical com uma altura de 60 m. A presença de câmeras e sensores no local reconstruiu a trajetória de voo e a forma do corpo do falcão durante determinadas fases do voo.

Quase todas as espécies de aves podem alterar o formato de suas asas e, portanto, pode alterar as suas propriedades aerodinâmicas (Nachtigall, 1975 apud Ponitz 2014), um conceito conhecido como "*morphing wing*" (Lentink et al. 2007 apud Ponitz 2014). Durante um mergulho, peregrinos também podem alterar a forma de suas asas; enquanto o pássaro acelera, ele as move para mais perto de seu corpo, assemelhando-se a um formato de diamante (Franklin, 1999 apud Ponitz 2014).

Embora o voo em queda livre de falcões peregrinos tenha sido investigado no estudo, inicialmente medidas exatas de forças de aceleração, forças de arrasto, ângulos de voo e aerodinâmica correspondentes ao fluxo ao redor do corpo não foram determinadas com precisão. Por isso, o estudo foi aprofundado, com o auxílio de câmeras de vídeo de alta velocidade e sensores de precisão, assim, a forma do corpo do falcão em mergulho a uma velocidade máxima de voo foi registrado. Através das imagens, criou-se um modelo de cloreto de polivinilo semelhante a ele para utilização em ensaios com túnel aerodinâmico.

O modelo semelhante ao falcão em conjunto a um túnel aerodinâmico permitiu a determinação de forças de sustentação e arrasto para diferentes ângulos de ataque do modelo de falcão. A partir destes dados podem-se deduzir as condições de voo reais (ângulo de ataque). O método que foi utilizado para a visualização do escoamento do ar na zona de superfície ao redor do modelo do falcão foi através do espalhamento de uma tinta a base de óleo sobre o modelo produzido como réplica do falcão real. As verificações dos resultados qualitativos foram feitas comparando as estruturas cobertas de tinta a óleo com os campos de velocidade do escoamento de ar. O cruzamento de dados entre os resultados forneceu informações detalhadas sobre a aerodinâmica e adaptações estruturais do corpo do animal, durante o mergulho em alta velocidade.

A altura da parede da barragem é de 60 m, o ângulo da superfície inclinada é de  $21^\circ$  em relação à vertical. A parte frontal dos pontos posicionados da parede é ao sul garantindo condições de luz ideais para gravações de imagens com câmeras de alta velocidade. No total, foram registados 35 voos, porém apenas um foi analisado em detalhe para que se obtivessem os valores de aceleração e a forma do corpo do animal no momento do voo. Devido ao treinamento de mergulho pelo falcoeiro, todos os 35 voos apresentam características quase idênticas, portanto, somente um trajeto de voo representativo é mostrado em detalhes. A massa do falcão foi determinada em 0,5 kg.

Durante o procedimento de medição foram utilizadas duas câmeras sincronizadas. Ambas as câmeras armazenavam as imagens gravadas na memória interna por alguns segundos antes e depois do sinal de disparo. Este

método garantiu que todo o voo fosse capturado dentro de uma sequência de gravação, como se observa na figura 12.

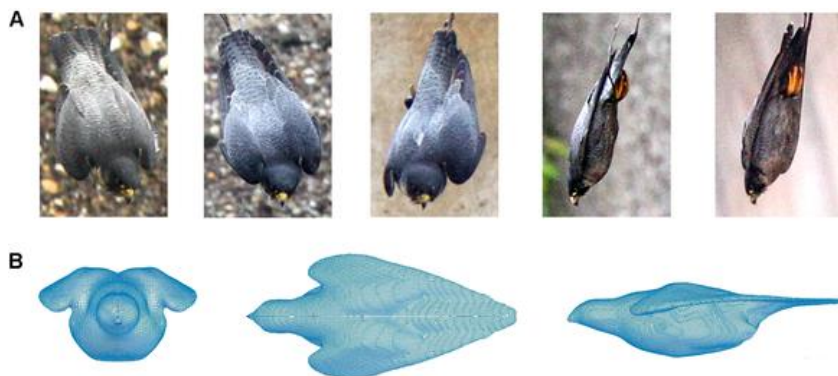
Figura 12 - Set experimental em frente a barragem (Olef-Talsperre, Hellenthal, Alemanha).



Fonte: Ponitz et al 2014

Para obter o contorno do corpo correspondente de um falcão peregrino durante um voo em velocidade máxima, em um dos experimentos utilizou-se um corpo real de um falcão peregrino do sexo feminino e modificaram-se manualmente suas asas. O corpo modificado foi fixado e posteriormente digitalizado, como se observa na figura 13, obtendo-se, um modelo em escala real fabricado por tecnologia CNC (controle numérico computadorizado), utilizando os dados 3D adquiridos.

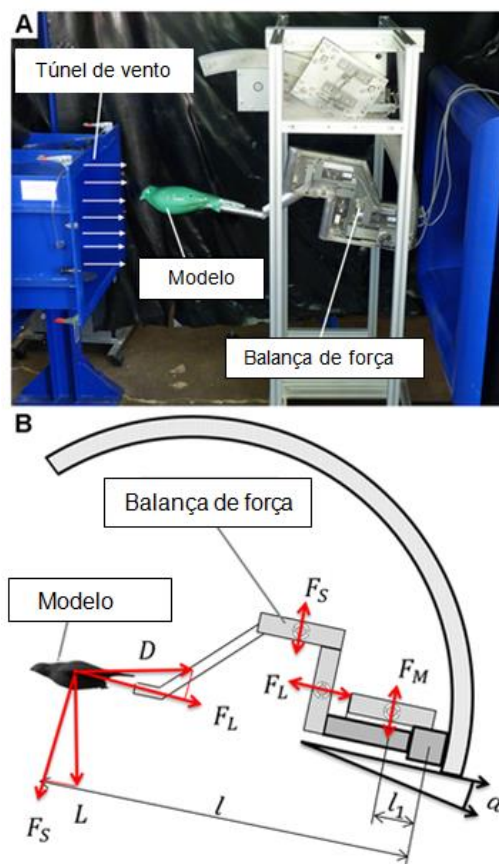
Figura 13 - Transformação de um verdadeiro falcão (A) para um modelo de tamanho real (B).



Fonte: Ponitz et al, (2014)

Um túnel aerodinâmico foi utilizado para as medições do modelo em tamanho real do falcão. O modelo foi fixado sobre a ponta de um dispositivo de equilíbrio de forças e posicionado no centro do fluxo de ar principal. A relação entre dimensões do modelo do falcão e o túnel aerodinâmico é de 4,1%, de forma que efeitos de bloqueio são insignificantes, como se observa na figura 14.

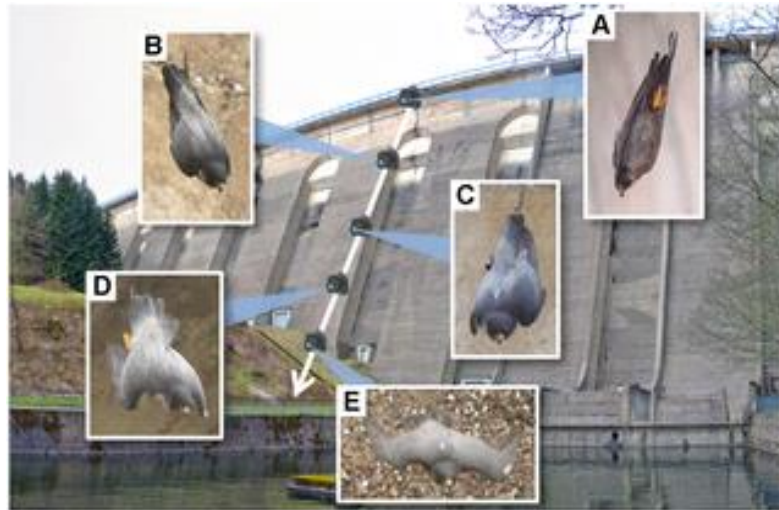
Figura 14 - Modelo de falcão e do dispositivo de medição no interior do túnel aerodinâmico (A). Esquema do funcionamento das forças (B).



Fonte: Ponitz et al, (2014)

De acordo com a figura 15, uma sequência de imagens durante um mergulho foi capturada nos pontos indicados como A, B, C, D e E com a trajetória 3D de voo (duração de 6 s).

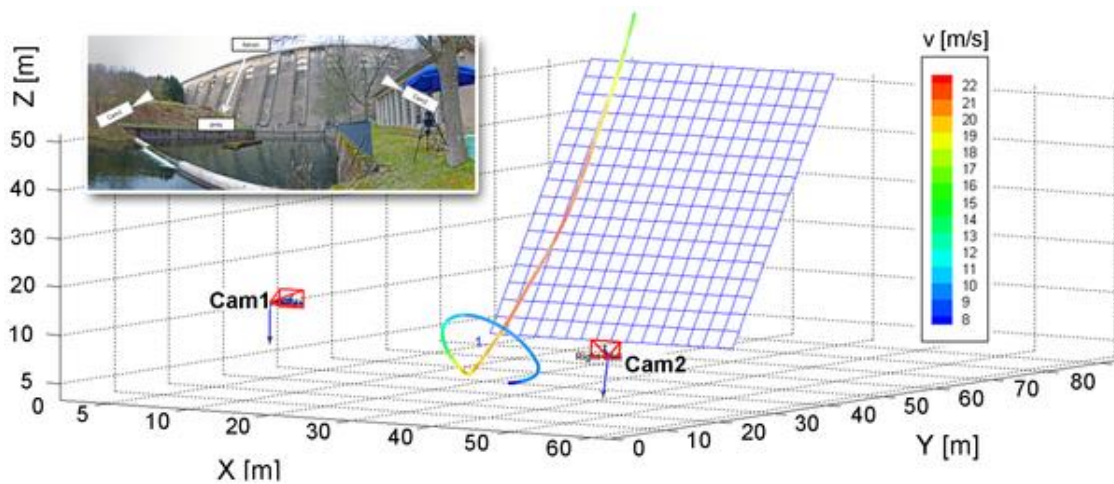
Figura 15 - Estudos de detalhe para as formas específicas de asa.



Fonte: Ponitz et al, (2014)

Na figura 16, a trajetória de voo 3D do falcão é reconstruída com um código de cores de acordo com a magnitude da velocidade de voo (cor vermelha: velocidades superiores). A velocidade máxima durante o mergulho foi de 22,5 m/s.

Figura 16 - Orientação tridimensional da câmera.



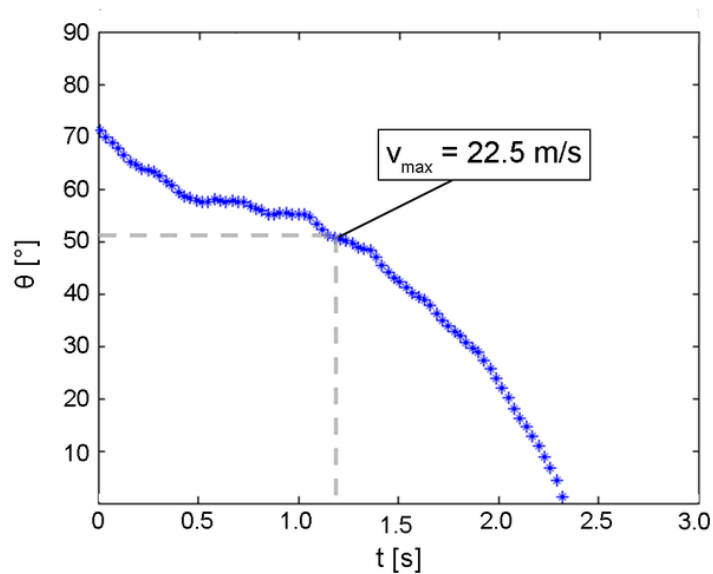
Fonte: Ponitz et al, (2014)

Durante a primeira fase do voo, o falcão iniciou com 6,8 m/s. Sua velocidade aumentou posteriormente de 15,0 m/s para 22,5 m/s, durante esta fase, o falcão cobriu uma distância vertical de 18,55 m, como representado no gráfico 4, em um tempo de 1,2 s.

Depois de um curto período de velocidade constante de mergulho, o falcão desacelerou e dentro de 1,2 s sua velocidade diminuiu de 22,5 m/s para 19,4 m/s. Observando o ângulo da trajetória de voo durante a fase de desaceleração, foi uma diminuição de 50,75° a 0°.

Como resultado neste ensaio observou-se que o desvio na trajetória de voo foi cerca de 50,75 ° quando o pássaro alcançou à velocidade máxima. Este ângulo descreve o desvio de voo em relação à horizontal (voo horizontal:  $\theta = 0^\circ$  mergulho vertical:  $\theta = 90^\circ$ ).

Gráfico 4 - Variação de voo e  $\theta$  ângulo na fase de monitoramento.



Fonte: Ponitz et al, (2014)

O experimento encontrou o ângulo de ataque durante o mergulho, ou seja, quando o falcão atingiu a velocidade máxima com as asas em forma de V. Os valores correspondentes ao coeficiente de arrasto para a fase de voo foram a partir de  $\alpha = 5^\circ$ , como observa-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Sustentação e coeficientes de arrasto para uma direção paralela de fluxo ( $\alpha = 0^\circ$ ) e um ângulo de ataque  $\alpha = 5^\circ$  para uma velocidade de 22,5 m/s.

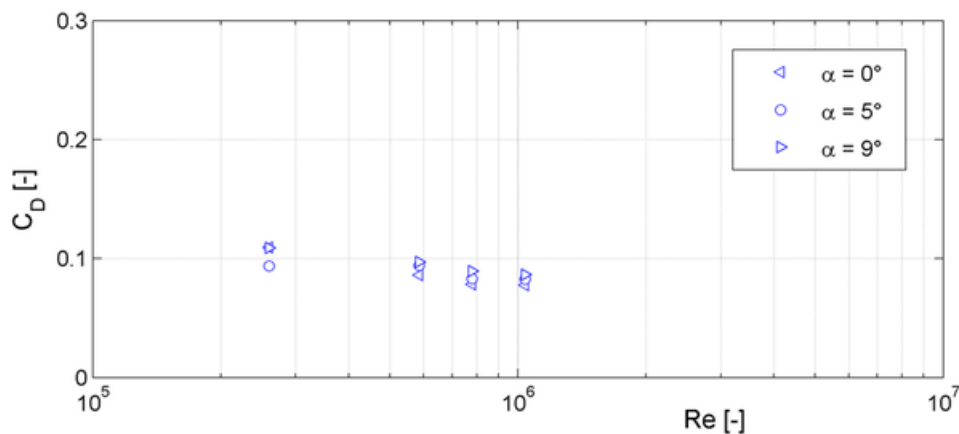
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 5^\circ$
Sustentação $C_L$	0,0445	0,0870
Coeficiente de arrasto $C_D$	0,0860	0,0941

Fonte: Ponitz et al, (2014)

Como referência, os valores de um ângulo de ataque de  $\alpha = 0^\circ$  são também fornecidas. Os testes no túnel aerodinâmico com velocidades do escoamento também foram realizados para investigar a turbulência sobre as forças de sustentação e de arrasto. O número de Reynolds para a máxima velocidade de mergulho, igual a 22,5 m/s com o comprimento característico do falcão totalizando 0,4m é de aproximadamente 585000.

No gráfico 5, o Coeficiente de arrasto versus número de Reynolds do modelo de falcão para diferentes ângulos de ataque  $\alpha$ . As medidas foram feitas para diferentes números de Reynolds [ $Re = 260\ 000$  ( $v = 10\ \text{ms}^{-1}$ ),  $Re = 585\ 000$  ( $v = 22,5\ \text{ms}^{-1}$ ),  $Re = 780\ 000$  ( $v = 30\ \text{ms}^{-1}$ ) e  $Re = 1\ 040\ 000$  ( $v = 40\ \text{ms}^{-1}$ )].

Gráfico 5 - Coeficiente Aerodinâmico versus número de Reynolds do modelo de falcão para diferentes ângulos de ataque  $\alpha$ .



Fonte: Ponitz et al, (2014)

## 2.14 Visualização do escoamento perto da superfície

Conforme a figura 17 apresenta, algumas áreas do corpo do modelo de falcão peregrino foram pintadas com óleo antes de serem testadas no túnel aerodinâmico em uma simulação de voo. No caso das ventoinhas foi feita uma experiência com fumaça para observar-se o mesmo fluxo ao redor do corpo de prova, porém, não possível observar um resultado claro. Neste caso do falcão peregrino, a visualização foi feita com uma pintura na superfície do modelo que objetivava descobrir áreas com diferentes padrões topológicos. A partir dessas estruturas formadas pelo óleo foi possível tirar conclusões sobre o comportamento do fluxo de ar ao redor do corpo do pássaro durante a

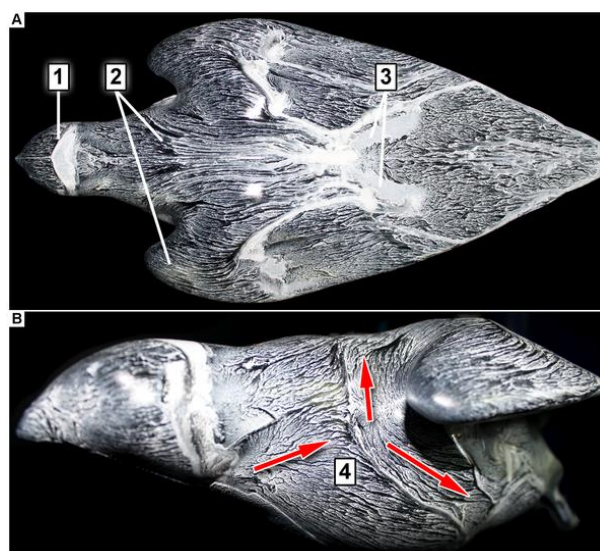


simulação de um voo, pontos de separação da camada limite ficaram evidenciados como constatam Robinson SK 1991apud Ponitz et al, (2014), Hussain AKMF 1986 apud Ponitz et al, (2014).

A área (1) mostra a estrutura de fluxo por cima da cabeça, as linhas deixadas pelo óleo próximo à parte frontal da cabeça estão alinhadas na direção do fluxo. Nesta região existe uma parte mais brilhante, onde o óleo se acumula indicando uma separação de fluxo local onde a passagem do óleo foi fortemente reduzida no momento. Passando essa região o fluxo se redistribuiu novamente.

Na região de pescoço do falcão existe uma zona mais escura, o que indica uma velocidade local superior, como aparece na região 2, ordenadas sobre a asa em forma de V. A maior intensidade de óleo ao redor da região 3 indica uma outra parte onde a separação de fluxo local ocorreu. Na região 4 da vista lateral do modelo aparece uma formação de linha corrente, provavelmente de separação, ainda nesta região, um ponto de estagnação no sulco entre o corpo e a asa. Conseqüentemente, o transporte de óleo neste momento é espalhado de forma desigual em diferentes partes do corpo do modelo. O ângulo de ataque nesta posição apresentada é igual a 5°, a direção do fluxo é da esquerda para a direita.

Figura 17 - Modelo de falcão pintado com tinta a base de óleo para visualização do escoamento de ar ao redor do modelo.

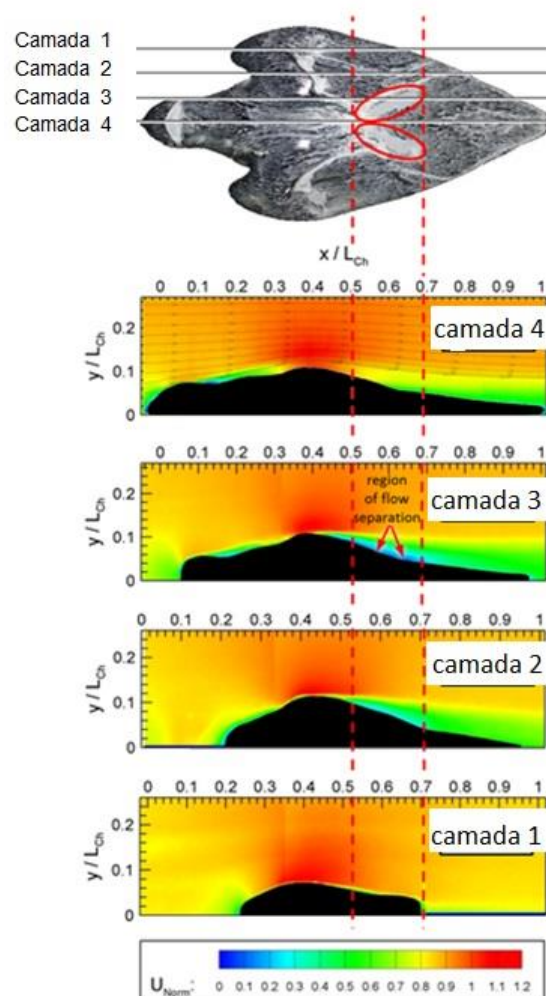


Fonte: Ponitz et al, (2014)

A fim de obter mais informações na figura 18, foi analisado o fluxo ao redor do modelo através de contornos de velocidade constante em quatro seções transversais (camadas 1-4), como observamos na figura 18.

A camada 1 corta o eixo de simetria ao passo que as camadas 2 até 4 têm um deslocamento, em cada caso, de 14 mm em relação à camada anterior. A área de interesse, onde a separação de fluxo foi vista é marcada com linhas de cor vermelha. Avista de topo com tinta à óleo no modelo acima mostra que apenas onde existe uma maior intensidade de óleo a separação de fluxo é vista. Exatamente nesta região os resultados nas imagens (PIV) mostram velocidades iguais a zero avaliadas em comparação com as outras camadas.

Figura 18 - Visualização do escoamento em quatro seções transversais do modelo falcão via particle image velocimetry (PIV).



Fonte: Ponitz et al, (2014)

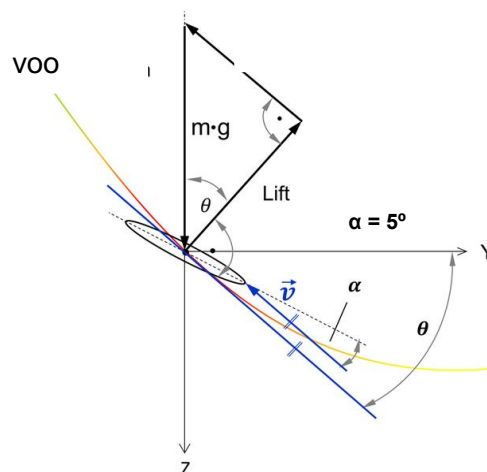
## 2.15 Resultado do experimento e sua influência na superfície da ventoinha

Para a projeção de duas das ventoinhas finais desta pesquisa, os resultados deste estudo sobre o falcão peregrino foram fundamentais. A determinação do ângulo de ataque (parte frontal da asa) do animal em posição de voo foi de  $5^\circ$  no momento de maior velocidade, a forma como as penas da asa do animal são dispostas também influenciaram na criação das texturas para as ventoinhas. Tanto as pás da ventoinha como o corpo de um falcão tem um funcionamento que busca atingir altas velocidades através do vento e da sua aerodinâmica.

Este estudo sobre o voo e a forma do falcão permitiu determinar o melhor ângulo de ataque para a ave atingir a sua velocidade máxima. A trajetória de um falcão peregrino foi registrada; com uma câmera de alta resolução, que capturou simultaneamente imagens do corpo e das asas. Através dessas imagens, juntamente com os outros estudos observou-se que o pássaro chegou a uma velocidade máxima de 22,5 m/s com coeficiente de sustentação de sustentação  $C_L = 0,0870$  e coeficiente de arrasto igual a  $C_D = 0,0941$ , tendo aumento de 96% de sustentação e um aumento de 10% para o arrasto em comparação com os valores obtidos com um ângulo de ataque igual a zero ( $\alpha = 0^\circ$ ).

A figura 19 apresenta as forças que atuam no falcão durante o mergulho em velocidade máxima e aceleração zero.

Figura 19 - As forças que atuam no falcão.

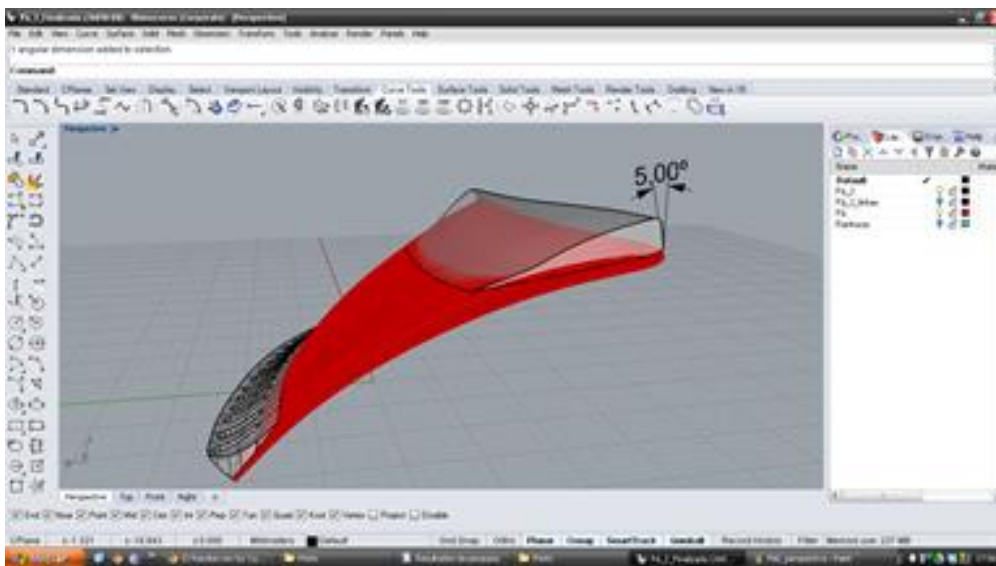


Fonte: Ponitz et al, (2014)

A forma típica, tanto do corpo como das asas do falcão peregrino, evidencia uma estrutura do tipo V, com as extremidades abertas entre os ombros e a cauda. A borda de ataque (parte da frente) das asas não é reta, mas tem uma estrutura ondulada, com ranhuras entre o pescoço e os ombros.

As imagens do voo mostram que as penas se destacam durante o mergulho exatamente na mesma região da superfície superior (lado de sucção) da asa, onde os estudos de visualização de fluxo através de PIV (Particle Image Velocimetry) e também de pintura a óleo revelaram a separação da camada. Supõe-se que a presença das penas impede essa separação da camada durante o voo de mergulho do falcão peregrino, semelhante aos aerofólios cobertos com abas auto-adaptativa. A partir do que se observou neste estudo, foi feito um teste com uma ventoinha que se caracterizasse em partes com a asa do falcão, como ilustra a figura 20.

Figura 20 – Pá feita com ângulo de ataque de  $5^\circ$  e ranhuras no ângulo de saída.



O modelo foi prototipado e ficou entre as ventoinhas mais eficientes que se obteve neste estudo como será apresentado nos resultados.

## 2.16 Processos de Digitalização

A utilização das tecnologias 3D foi fundamentais nesta pesquisa, desde o modelo de cooler já existente que foi digitalizado aos modelos feitos por prototipagem rápida 3D.

O Design, por abranger todas as áreas industriais, torna necessário o aprimoramento das técnicas de aquisição e caracterização das texturas, a fim de que com estes dados se possa dispor de texturas diferenciadas e inovadoras. Assim, sistemas com alta tecnologia para aquisição de imagens e dados, como o Scanner 3D a Laser, softwares vetoriais e sistemas CAD/CAE/CAM foram ferramentas fundamentais para esta pesquisa.

O processo de Digitalização Tridimensional, através do scanner 3D, permitiu obter de forma precisa detalhes das superfícies e objetos de modelo. A digitalização Tridimensional foi utilizada basicamente para captar imagens e dados em 3D, e, com auxílio de ferramentas computacionais permitiu obter a modelagem completa das ventoinhas.

Atualmente, diversos sistemas de digitalização 3D de modelos reais estão disponíveis, sendo divididos, em sistemas com contato e sistemas sem contato. Segundo Silva (2006), a digitalização Tridimensional é utilizada basicamente para captar imagens e dados em 3D e, com auxílio de ferramentas computacionais, permite modelar objetos a partir do que foi digitalizado. A ventoinha tomada como base neste trabalho, foi digitalizada através do Scanner optimet conforme a figura 21.

Figura 21 - Scanner Tridimensional a Laser modelo Digimill 3D.



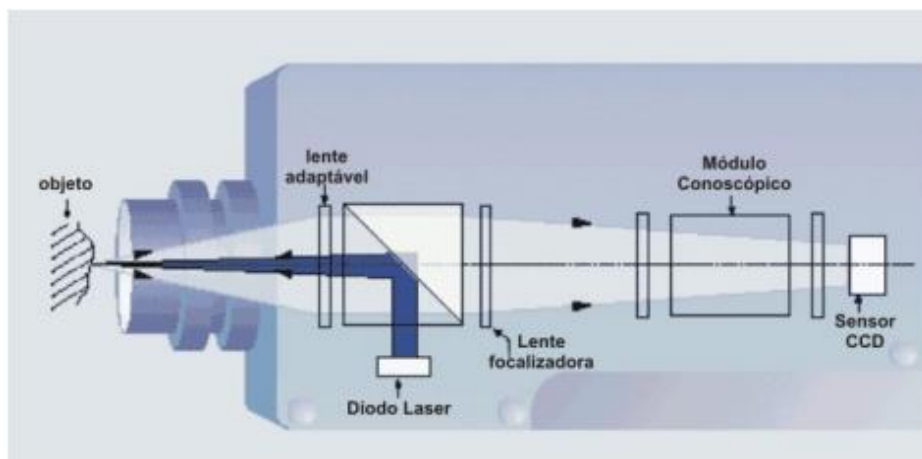
Fonte: equipamento instalado no LDSM/UFRGS. Silva (2011).

O Digimill 3D é um equipamento CNC (controlado numericamente por computador) o que possui dois cabeçotes, um para usinagem e outro para digitalização, ou seja, trata-se de um equipamento híbrido fresadora CNC e

scanner tridimensional a Laser. O cabeçote de digitalização conoscópico consiste na emissão, através de um diodo, de um feixe de Laser, que é refletido por um divisor de feixe e incide pontualmente sobre a peça a ser medida sem estabelecer contato físico. A luz dispersada retorna da peça, passa através do divisor de feixe e um cristal birrefringente, sendo detectada pelo sensor CCD (Dispositivo de Carga Acoplado) conforme a Figura 22. O Dispositivo de Carga Acoplado ou CCD (do inglês charge coupled device) é um tipo de sensor formado por um conjunto de capacitores sensíveis a luz. O cristal birrefringente modifica diferentemente a velocidade de cada raio de luz de acordo com seu ângulo, criando um padrão de franjas com alto contraste no detector CCD. Uma vez que o ângulo do raio de luz é função da distância entre um plano de referência e o ponto de Laser projetado no objeto, esta distância pode ser então determinada pela análise das características do padrão criado.

A relação entre o sinal no detector CCD e a distância dos objetos é determinada por um processo preciso de calibração realizado para cada lente objetiva utilizada (Optimet, 2003).

Figura 22 - Princípio de operação do sensor conoscópico a Laser do Scanner Optimet.



Fonte: Optimet (2003).

Segundo Sokovic (2005) a Digitalização Tridimensional a Laser é um método rápido e preciso no eixo Z, sendo também possível digitalizar materiais macios (que se deformem com o contato) ou até mesmo líquidos. Segundo Ferreira (2003), a digitalização e reconstrução de formas complexas de objetos têm evoluído rapidamente nos últimos anos, sendo que o método de

escaneamento 3D a Laser traz uma maior automação na aquisição de dados. Segundo Freitas (2006), os dados fornecidos pela digitalização 3D são sempre um conjunto de coordenadas de pontos.

## 2.17 Processo de Impressão 3D

Prototipagem Rápida é o nome dado às tecnologias utilizadas na fabricação de protótipos físicos 3D a partir de um modelo 3D virtual produzido em software CAD (*Computer Aided Design*). O modelo 3D virtual deve ser exportado em formato compatível com o programa que controla a impressora 3D utilizada na prototipagem (RODRIGUES et. al., 2013)

O processo usado na prototipagem rápida ilustrada pelo fluxograma da figura 23. Os modelos feitos neste trabalho foram gerados por fotopolimerização. A maioria dos Processos de Prototipagem Rápida trabalha com a tecnologia de adição sucessiva de camadas bidimensionais (LMT, *Layer Manufacturing Technologies*).

- A nomenclatura mais atual para estes processos é Manufatura Aditiva
- Tais processos, apesar de possuírem princípios físicos distintos, apresentam uma sequência muito parecida para a obtenção de um objeto 3D.

Figura 23 - Esquema de prototipação rápida.



Fonte: Silva (2013).

## 2.18 O Arquivo STL

O STL (*STereo Lithography*) é o formato padrão na indústria para os sistemas de Prototipagem Rápida. Como o nome diz, ele foi originalmente desenvolvido para o processo de SLA, mas rapidamente foi adotado por todas as tecnologias de Prototipagem Rápida. O STL se baseia na representação de modelos 3D como uma matriz de coordenadas de triângulos planos (faces) que permitem que o modelo seja fatiado pelos programas de operação dos equipamentos.

## 2.19 Fotopolimerização

No ano 2000 a empresa israelense Objet Geometries lançou o sistema *Polyjet*, em que a construção do modelo ocorre através de um processo aditivo de camadas de resina acrílica fotopolimerizável, sem a necessidade de pós-cura. Na tecnologia *PolyJet* o modelo virtual é fatiado em camadas de 0.016mm de espessura e injetado por um cabeçote de impressão, constituído por centenas de micro-difusores.

É injetada uma camada de 0.020mm de resina sobre a plataforma de construção que é retificada aos 0.016mm pela passagem de um cilindro. A resina é polimerizada por ação de radiação ultravioleta durante o próprio processo de injeção. Neste processo é necessária uma estrutura de suporte, que é construída com uma resina solúvel em água e injetada simultaneamente com a resina acrílica do modelo.

Os novos equipamentos da Objet (Linha Connex) trabalham com a tecnologia *PolyJet Matrix*, também sendo multi-material. Podem depositar camadas de até 0.016mm (*PolyJet*) de resinas fotopolimerizáveis. Até dois materiais podem ser injetados simultaneamente através de um cabeçote de impressão que tem regiões diferentes de acordo com o tipo de cada material.

Através de diferentes combinações de materiais podem ser compostos novos materiais com diferentes propriedades, os quais a empresa batizou como “materiais digitais”, por exemplo, pode-se variar a flexibilidade das partes do protótipo, ou mesmas características de cor e transparência, conforme a figura 24.



Figura 24 - Modelo feito através da tecnologia polyjet.



Fonte: [www.solidconcepts.br.com](http://www.solidconcepts.br.com)

## 2.20 Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer

O Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer é uma unidade de pesquisa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) que atua na pesquisa e no desenvolvimento em tecnologia da informação. Segundo ao site da instituição, existe uma intensa interação com o setor acadêmico, através de diversas parcerias em pesquisa, e industrial, em vários projetos de cooperação com empresas, mantém o CTI no estado da arte em seus principais focos de atuação, como a área de componentes eletrônicos, microeletrônica, sistemas, displays, software e aplicações de TI, como robótica, softwares de suporte à decisão e tecnologias 3D para indústria e medicina.

O CTI Renato Archer apoiou esta pesquisa, se disponibilizando a produzir as cinco peças para o desenvolvimento dos ensaios. As peças foram feitas de resina fotopolimerizada, como podemos observar na figura 25, produzidas na impressora *Selective Laser Sintering Objet Connex350 Multi-Material 3D*, para posteriormente serem testadas no túnel aerodinâmico.

Figura 25 - Selective Laser Sintering Objet Connex350 Multi-Material 3D Printer.



Fonte: Centro de Pesquisa Renato Archer. 2014

A integração com a academia, por exemplo, a UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) e o setor produtivo faz com que o CTI seja capaz de atender e fomentar pesquisas focadas em prover soluções e inovações para o mercado. Em Campinas, contando com cerca de 280 pesquisadores atuando em 10 laboratórios, o CTI dispõe de uma infraestrutura especializada, em atividades voltadas para geração de inovação.

Cada um dos grupos de pesquisa oferece uma série de serviços, como treinamentos, consultoria, prototipagem de produtos, dispositivos eletrônicos e para área médica, testes de qualidade em hardware e software, suporte à decisão e muitos outros. Os serviços estão subdivididos em três grandes áreas de atuação: microeletrônica, software e aplicações. A interação com a UFRGS e com este trabalho foi por meio da Divisão de Tecnologias Tridimensionais (DT3D) chefiada pelo Prof. Jorge Vicente Lopes da Silva.

## **2.21 Divisão de Tecnologias Tridimensionais (DT3D)**

A Divisão de Tecnologias Tridimensionais (DT3D) foi o núcleo que aceitou apoiar este projeto. Segundo ao site da instituição, desde 1997, tem se dedicado à pesquisa, desenvolvimento e aplicações destas tecnologias em diversas áreas do conhecimento, apoiando a indústria, a área medica e projetos de pesquisa internos e em parceria com várias universidades, conforme a figura 26. Os resultados são expressivos tendo uma difusão tecnológica permanente, por meio de congressos e palestras específicas. Mais

de 2.300 casos de planejamento cirúrgico e dezenas de experimentos de universidades brasileiras receberam o apoio desta divisão.

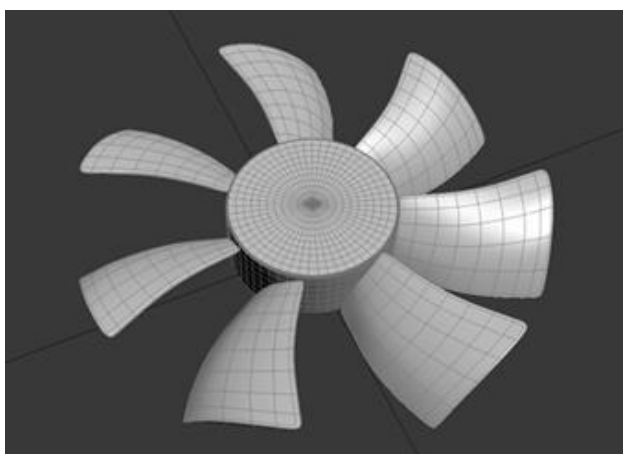
Figura 26 - Tecnologia 3D aplicada à área médica (reconstrução do crânio de um paciente).



Fonte: <http://www.cti.gov.br/dt3d-slideshow> (2014).

Para desenvolver um trabalho em parceria com a CTI, foi necessário fazer um contato, explicando os objetivos do trabalho, de que forma o auxílio deles seria fundamental. Posteriormente foram enviadas algumas imagens das peças, conforme figura 27, e através destas foi possível calcular o custo do material utilizado e investigar qual máquina seria a mais apropriada para produzir as peças.

Figura 27 - Modelo enviado ao CTI para avaliação técnica.



O CTI, então, faz uma análise da qualidade do trabalho e de sua relevância, decidindo apoiar ou não o projeto. A presença do autor do projeto não é obrigatória, porém, foi bastante apropriado o acompanhamento da fabricação das peças, em nível de conhecimento de processos de fabricação e impressão 3D. A divisão de tecnologias tridimensionais do CTI, conta com uma série de máquinas em seu espaço físico, capazes de desenvolver uma grande variedade de protótipos, com o uso de materiais diversificados, como podemos observar na figura 28.

Figura 28 - Algumas das máquinas da Divisão de Tecnologias Tridimensionais do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI).



## 2.22 Túnel Aerodinâmico

O túnel aerodinâmico tem como finalidade simular as principais características do vento natural no local e o aspecto de energia das rajadas, inclusive ação das rajadas laterais (e, em certos casos, verticais) que no

processo manual seria necessário um cálculo adicional. Além de simular o vento natural, o túnel aerodinâmico também permite a pesquisa de efeitos estáticos e dinâmicos do vento em estruturas. (DAVENPORT, ISYUMOV, 1967).

## 2.23 Túneis do centro de energia eólica PUCRS

O túnel aerodinâmico (Figura 29) do CE-EOLICA (Centro de energia eólica) foi especialmente projetado para calibração de anemômetros e para o estudo de aerodinâmica de aerofólios, utilizados na indústria de energia eólica.

Figura 29 - Túnel aerodinâmico 1 - Monitorado para testes de perfis aerodinâmicos.



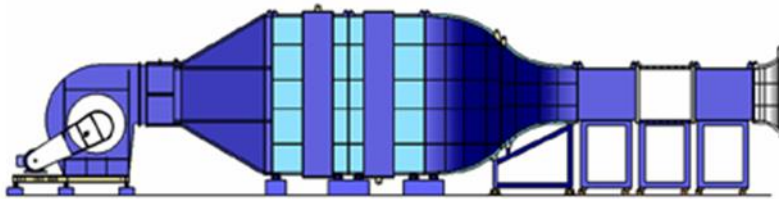
O objetivo desse túnel aerodinâmico é ensaiar perfis aerodinâmicos, encontrando o coeficiente de arrasto, sustentação e geometrizar o perfil como um todo. Esse túnel já foi totalmente mapeado em um trabalho de anos, com especificações de cada ponto de pressão e temperatura que possui, proporcionando um controle capaz de precisar velocidade do escoamento de ar, pressões envolvidas, intensidade de turbulência, umidade, massa específica, velocidade de corrente livre, para então encontrar o coeficiente adimensional.

O laboratório ainda conta com um manômetro de coluna que gera gráfico com até 25 pontos de pressão (coluna de fluido, no caso deles é a água). Por fim, segundo explicações do técnico do laboratório, os pesquisadores ainda fazem uma simulação de elementos finitos para finalizar a

projetação dos aerofólios. Na figura 30, é apresentada uma ilustração do Túnel aerodinâmico 1.

- a) Comprimento: 12 m
- b) Secção de teste: 1 m x 1m
- c) Relação de contração: 9
- d) Potencia do motor: 59 kW
- e) Velocidade Máxima: 25 m/s

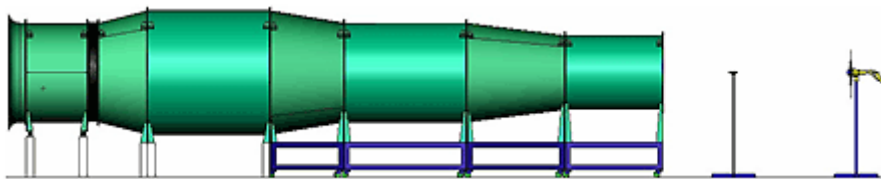
Figura 30—Ilustração do Túnel Aerodinâmico 1



Fonte: <http://www.pucrs.br/ce-eolica/>

No final dos testes é acoplado um gerador elétrico para medir quanto é possível de captação de energia e o aerofólio passa a ser testado no túnel de vento 2, ilustrado pela figura 31, que possui maior turbulência simulando as condições naturais do ambiente externo.

Figura 31—Ilustração do Túnel 2 - simulador túnel de vento (sem estabilizador).



Fonte: <http://www.pucrs.br/ce-eolica/>

Algumas informações básicas do túnel 2, como observamos na figura 32, são:

- a) Comprimento: 12m
- b) Potência do motor: 74 kW
- c) Rotação: 890 rpm
- d) Secção de teste variável: 2,5m à 1,5m

Figura 32 - Túnel 2– Simulador túnel de Vento.



## 2.24 Túnel aerodinâmico da escola de engenharia mecânica da UFRGS

O túnel aerodinâmico Prof. Debi Pada Sadhu, conforme figura 33, pertencente ao Laboratório de Estudos Térmicos e Aerodinâmicos (LMF) da UFRGS foi construído com o objetivo de permitir o estudo de escoamentos sobre perfis aerodinâmicos através de medidas de pressão e da visualização propriamente dita, tendo em vista que já foram realizados outros experimentos para a visualização de escoamentos de gases e outros resultados. O túnel aerodinâmico possui as seguintes dimensões e características:

- a) Comprimento: 6,3m;
- b) Área da seção comum: 1m<sup>2</sup>
- c) Rotação máxima do motor do exaustor: 1160 rpm;
- d) Velocidade máxima do ar: 9m/s

Figura 33 - Túnel aerodinâmico Prof. Debi Pada Sadhu.



## 2.25 Túnel de vento da escola de engenharia civil

Na UFRGS, o túnel de vento foi construído pela iniciativa do engenheiro civil Joaquim Blessmann, em 1972. Localizado dentro do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) como observa-se na Figura 34. Seu uso tornou-se intenso a partir de 1996, quando o Brasil passou a otimizar as construções e torná-las mais seguras e resistentes à pressão dos ventos. "O túnel de vento é a ferramenta mais eficaz para detectar e controlar o efeito de fenômenos aerodinâmicos em obras civis", explica o professor da UFRGS, Acir Mércio Loredo-Souza, que dirige o LAC.

Figura 34 - Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann.



Um túnel de vento de camada limite, como o Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, é capaz de resolver problemas associados aos efeitos estáticos e dinâmicos do vento



em edificações, tais como o prognóstico depressões, tensões, deformações, cargas nas fundações, deslocamentos e vibrações, influência de detalhes arquitetônicos, entre outros. Este laboratório, pioneiro na América do Sul, tem mais de 35 anos de experiência em estudos de aerodinâmica das construções, tendo contribuído de forma decisiva para a elaboração da norma brasileira NBR6123 - Forças devidas ao vento em edificações.

Este túnel de vento já atendeu mais de 300 projetos da construção civil. O procedimento começa com o envio das plantas em Autocad ao laboratório. A partir daí, os engenheiros do LAC projetam modelo reduzido para submetê-la ao ensaio. “Além da edificação, reproduzimos todo o contexto no qual ela será inserida, como as construções do entorno e tudo o que possa interferir na pressão do vento”, explica Acir. Segundo ele, os testes em túneis de vento representam 1% do valor da obra. “É um investimento, pois o estudo mostra o desempenho da edificação”, completa o professor.

## **2.26 Design de Superfícies em pás e escoamento**

Existem dois tipos de escoamento de fluidos que podem influenciar a eficiência de produtos que entrem em contato com o vento através de suas superfícies: o laminar e o turbulento. Segundo Shames (1995), o escoamento laminar é uma configuração ordenada, onde as camadas do fluido são consideradas deslizando umas sobre as outras, enquanto que o escoamento turbulento apresenta flutuações irregulares, podendo ser considerado como a superposição de um escoamento aleatório sobre um escoamento ordenado.

Para os autores Incropera e DeWitt (1998), as perturbações nas linhas de corrente de um escoamento laminar podem acabar levando a condições de turbulência. A projeção de texturas nas pás de uma ventoinha seria uma forma de induzir a rugosidade da superfície podendo dar origem a esta turbulência.

Segundo Silva (2006), o início da turbulência depende do fato de essas perturbações serem amplificadas ou atenuadas na direção do escoamento do fluido, o que, por sua vez, depende da razão entre as forças de inércia e as forças viscosas (o número de Reynolds). Se o número de Reynolds for pequeno, o escoamento será em regime laminar. Para um número de Reynolds

alto, ocorre o regime turbulento. Cabe salientar que o número de Reynolds é diretamente proporcional à velocidade do fluido e a dimensão característica.

Desta forma, França (2002) afirma que o arrasto depende da forma e da rugosidade da superfície. Assim, a utilização de texturas permite alterações consideráveis no que diz respeito à resistência devido ao arrasto, podendo gerar a eficiência esperada em relação às pás lisas. Rubini e Aguiar (2004), ainda apresentam que a textura da superfície também afeta o escoamento na camada limite. Ou seja, no caso de uma pá rugosa que irá sofrer uma crise em um número de Reynolds inferior ao de uma pá lisa, a rugosidade precipitará a turbulência na camada limite, reduzindo a resistência do ar a altas velocidades.

Temos como exemplos as bolas de golfe e de futebol que possuem uma superfície especial. Isto permite que elas sejam arremessadas a maiores distâncias. Segundo Scott (2005) apud Silva (2006) as texturas vêm sendo empregadas em aviões, especialmente nas asas, visando criar o mesmo efeito das reentrâncias nas bolas de golfe. Neste caso, o objetivo é criar a turbulência para retardar a separação da camada limite e aumentar a sustentação do avião.

Aproximando-nos do caso de ventoinhas com superfícies trabalhadas, já observa-se que Sharkoon (2005) apresenta um ventilador com texturas nas pás semelhantes a de uma bola de golfe para elucidar um caso em que a textura favorece um maior fluxo de ar, tornando o ventilador mais eficiente a menores velocidades de rotação, conseqüentemente, ou seja, menor consumo de energia e maior capacidade de arrefecimento.

## **2.27 Escoamento de Fluidos e crise do arrasto**

Segundo Silva (2006), o escoamento do fluido é caracterizado pela existência de duas regiões distintas, uma fina camada de fluido (camada limite), onde os gradientes de velocidade e as tensões cisalhantes são grandes, e uma região exterior à camada limite (corrente livre), onde estes gradientes e tensões são desprezíveis. Segundo Incropera e DeWitt (1998), com o aumento da distância percorrida pelo fluido (tamanho da placa), os efeitos da viscosidade penetram cada vez mais na corrente livre, e a camada limite aumenta, como é possível observar na Figura 22.

Considerando superfícies em movimento, como por exemplo uma bola, Rubini e Aguiar (2004), colocam que a camada limite é uma região que tende a se mover junto com a superfície. Segundo Silva (2006), isso explica porque as pás de um ventilador ficam sujas, pois as partículas de poeira acumuladas na superfície estão dentro da camada limite, onde não há escoamento de ar para varrê-las. Uma superfície, ao deslocar-se em um fluido (gás ou líquido), levando de arrasto consigo a camada limite, gastará maior quantidade de energia.

Para baixos números de Reynolds (menores velocidades e/ou menores diâmetros), a camada limite é laminar e envolve completamente a bola, já para Reynolds um pouco maiores, a camada limite separa-se da esfera na parte posterior.

A separação se deve ao fato de que as partículas de fluido que se chocam com a superfície frontal da esfera são levadas ao repouso, com um conseqüente aumento de pressão. A partir desse ponto, o fluido avança para as próximas regiões de menor pressão (gradiente de pressão favorável) e a camada limite se desenvolve até o momento em que a pressão atinge um valor mínimo. Na parte traseira da esfera o fluxo ocorre com um gradiente de pressão desfavorável e o fluido, não tendo energia suficiente para vencer a pressão crescente, desacelera, podendo parar e inverter sua direção formando vórtices e se afastando da superfície. As partículas que se afastam da superfície formam, na parte posterior da esfera, uma esteira, que contribui para a força de arrasto (SHAMES, 1995). Segundo Silva (2006) assim, ocorre uma diminuição significativa da pressão na parte de trás da esfera, os efeitos inerciais passam a dominar e há uma tendência de aumentar o arrasto. Como já exposto, com o suficiente aumento do número de Reynolds (maiores velocidades e/ou maiores dimensões), o escoamento se torna turbulento.

A turbulência faz com que a camada limite resista melhor à tendência de separação, e assim o ponto de descolamento se move mais para trás da esfera, diminuindo a área da esteira. A contração da esteira reduz a área da esfera submetida a baixas pressões, causando uma diminuição da resistência do ar. Este fenômeno é conhecido como crise do arrasto e pode ser observado na Figura 35 Rubini e Aguiar (2004). O aumento da rugosidade precipita a

turbulência na camada limite e, conseqüentemente, diminui a resistência do ar a altas velocidades.

Figura 35 - Crise do arrasto durante a trajetória de uma bola texturizada em comparação com uma bola lisa.



Fonte: Rubini e Aguiar, 2004.

A possibilidade de aplicação de texturas com vista ao melhor escoamento de fluidos também é uma realidade no atletismo. Roupas com texturas especiais, por exemplo, para natação e ciclismo, vêm sendo desenvolvidas com vistas à redução do atrito do corpo com a água. Segundo Cohen (2001), os fabricantes de maiôs combatem o atrito com um traje mais hidrodinâmico, com pequenas estruturas em forma de V, inspirado na pele de tubarão. Minúsculos sulcos no tecido permitem que a água passe pelo corpo mais livremente. Isso já está presente nos novos trajes, reduzindo em torno de 4% o atrito superficial (KNOBEL, 2004).

### 3. MÉTODOLOGIA EMPREGADA

O presente capítulo apresenta os métodos de pesquisa que foram utilizados para alcançar os objetivos propostos na pesquisa. São detalhados o processo de digitalização; processo de impressão e desenho de superfícies, testes e ensaios.

#### 3.1 Processo de Digitalização

Com o objetivo de obtermos os cinco modelos necessários para os ensaios deste trabalho, foi fundamental a utilização da digitalização tridimensional através do Scanner Tridimensional a Laser modelo Digimill 3D, disponibilizado pelo LdSM (Laboratório de design e seleção de Materiais).

Visto que, as ventoinhas tiveram como base um *cooler* (ventilador para CPU) já existente, a digitalização foi utilizada para captar imagens e dados em 3D com auxílio de ferramentas computacionais, permitindo que se obtivessem os detalhes de superfícies do *cooler*. O sistema de digitalização foi o mais indicado para formas como a de uma ventoinha, onde um grande número de pontos foi necessário ser coletados (figura 36).

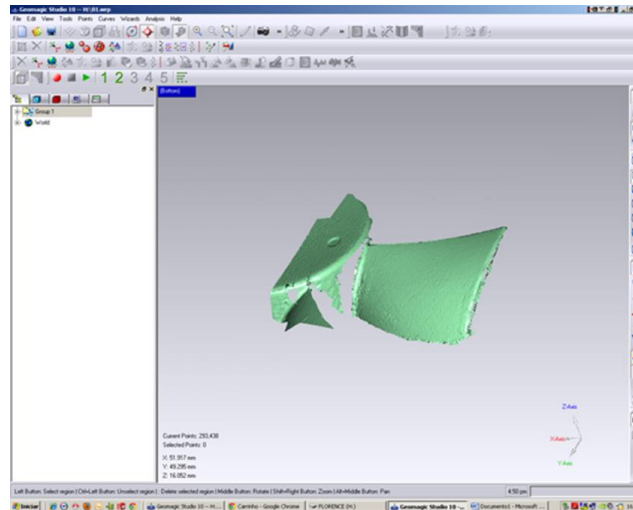
Figura 36 - Peça no LdSM da UFRGS sendo digitalizada no Scanner Tridimensional a Laser modelo Digimill 3D, em vista superior.



Após o processo de escaneamento da peça, (figura 37), gerou-se uma imagem enviada para o Software Geomagic. No software os detalhes da peça

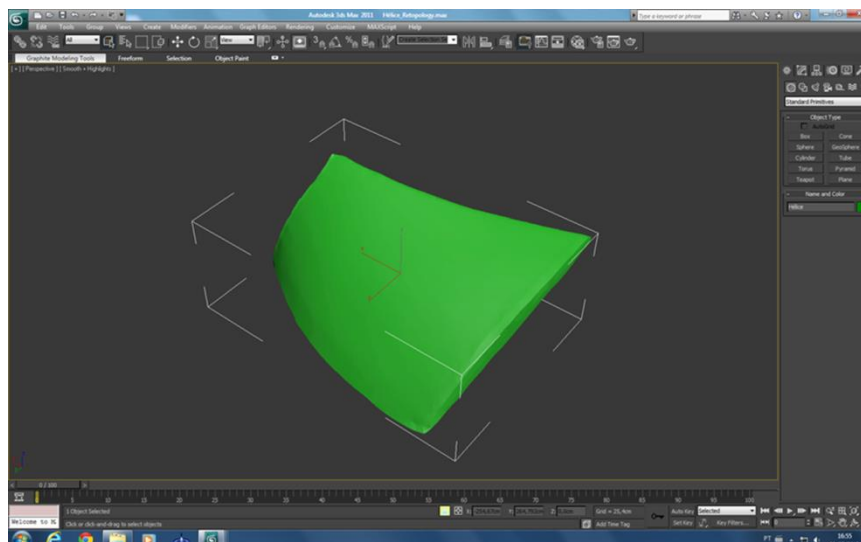
são preenchidos e analisados para serem modelados com semelhança à peça escaneada (figura 37).

Figura 37 - Imagem enviada pelo scanner para o Software Geomagic.



Apenas uma das pás foi escolhida entre as outras, como podemos observar na figura 38. A imagem da pá passou pelo processo de modelagem no Software *Geomagic*, utilizando a ferramenta de canto vivo para manter os ângulos, ao invés de arredondá-los.

Figura 38 - Imagem editada pelo Geomagic, enviada para o software 3DSMax.



Conforme ilustra a figura 39, uma superfície foi gerada no programa 3DSmax, com base na nuvem de pontos obtida no escaneamento da peça.

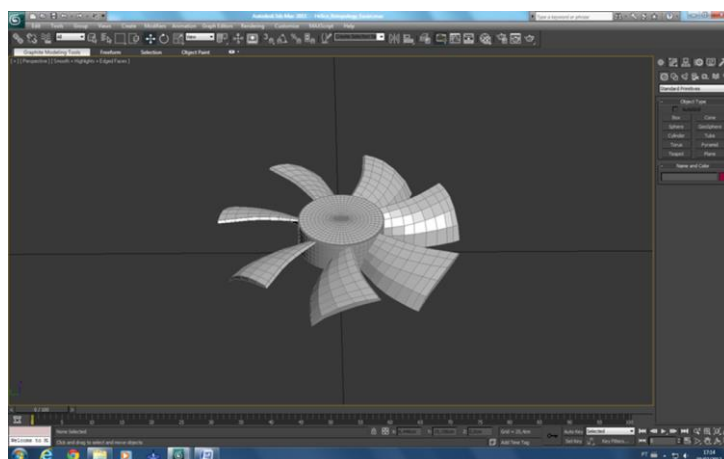
Essa malha poligonal foi modelada pelo processo de retopologia (capaz de transformar a malha triangular em uma malha que segue uma lógica ou um caminho, suavizando sua forma), feita para que se pudessem ordenar as linhas, obtendo um modelo simplificado, porém mais semelhante à pá, ilustrado na figura 39(B).

Figura 39 - (A) Malha fiel a peça escaneada. (B) Malha simplificada e mais ordenada em 3DSMax.



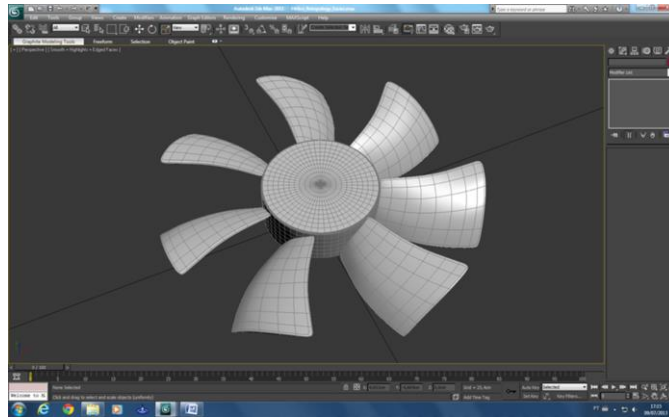
Conforme a figura 40 apresenta, apenas uma pá foi modelada, posteriormente esta foi replicada 6 vezes e cada uma destas cópias foi encaixada separadamente no eixo, semelhante a da peça escaneada.

Figura 40 - Resultado do encaixe das sete pás no eixo, ambos modelados com base na malha gerada pelo escaneamento.



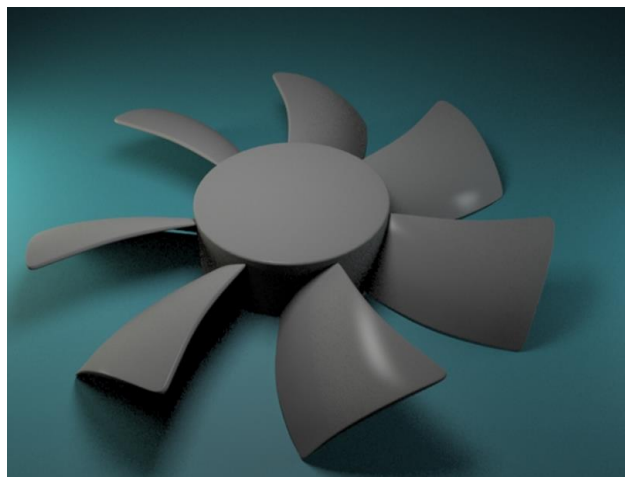
Seguindo a ordem do processo, a malha da ventoinha foi suavizada em todos os seus pontos, como ilustra a figura 41, o que proporcionou uma forma mais arredondada, ou seja, perdeu-se uma considerável precisão em relação à peça escaneada.

Figura 41 - Ventoinha suavizada em todos os pontos.



Nesta última etapa a ventoinha apareceu modelada nas dimensões corretas para ser fabricada por impressão 3D. O *cooler* escaneado e utilizado como base forneceu a proporção e a forma das pás, bem como suas curvaturas. A partir dessa etapa, obteve-se a ventoinha padrão lisa, com base nesse modelo inicial foram feitas as outras ventoinhas, mantendo-se apenas uma delas com a superfície lisa, as outras quatro peças tiveram suas superfícies texturizadas. A peça lisa foi o modelo padrão de comparação com as outras texturizadas, conforme apresenta a figura 42.

Figura 42 - Ventoinha padrão modelada com base na peça cooler escaneada.



Com os protótipos desenhados e impressos, foi possível realizar os ensaios para propor diferentes superfícies nas pás. Essa etapa garantiu ao trabalho um caráter comparativo preciso, pois essa peça base poderia ser impressa várias vezes, apenas variando a superfície das pás.

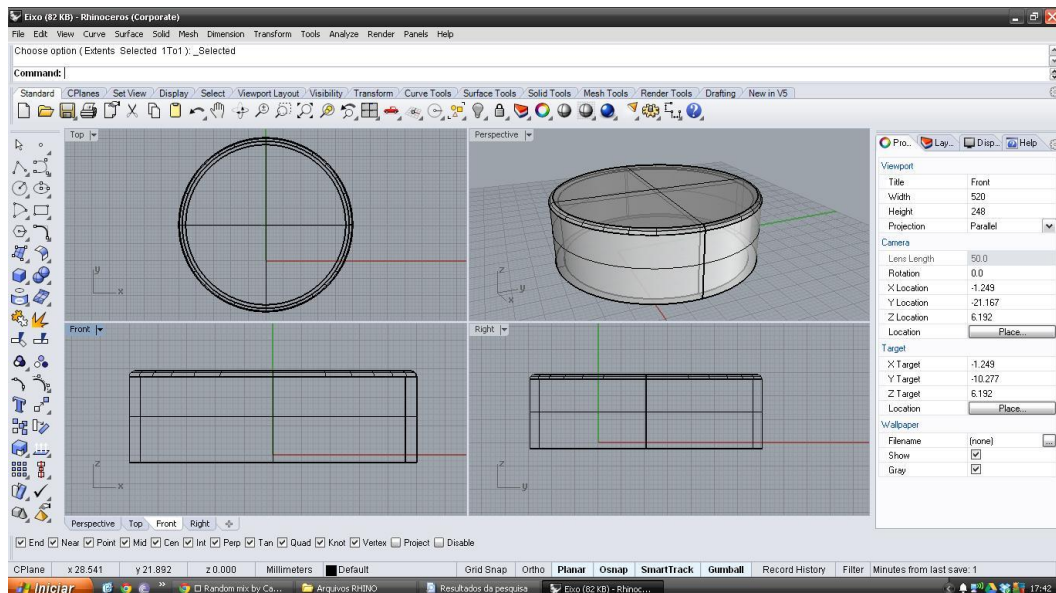


### 3.2 Modelagem geométrica das superfícies das pás

Após os resultados obtidos com massa de modelar escolar foi possível definir quais texturas iriam ser executadas. O projeto de cada textura, começou a partir da malha escaneada e depois modelada no programa 3DSMax disponível no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM). A partir do desenho da ventoinha padrão lisa foram sendo adicionadas e modeladas as superfícies sobre a base de cada uma delas no programa Rhinoceros (versão estudante disponível no LdSM).

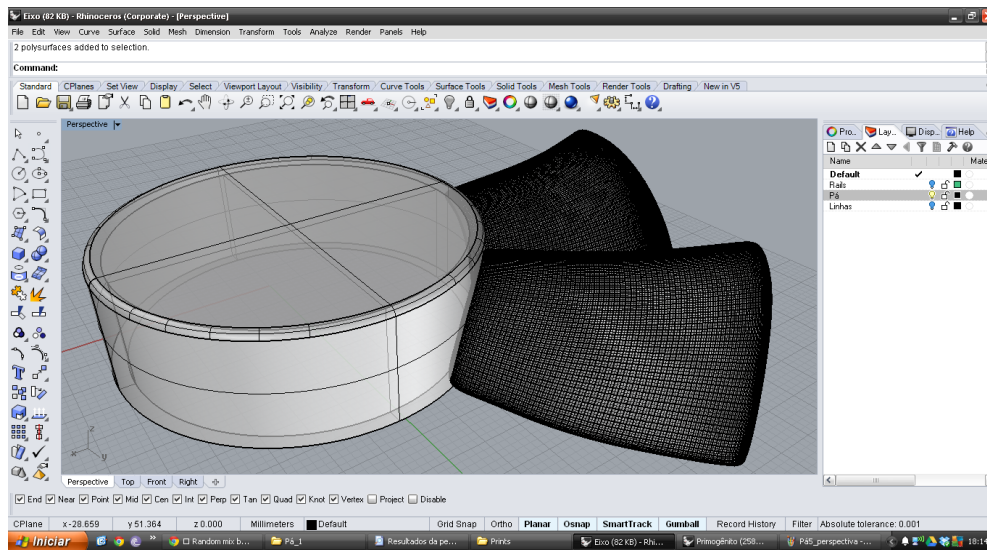
Como observamos na figura 43, o cilindro foi projetado com 49mm de diâmetro, servindo de eixo onde as pás replicadas seriam anexadas.

Figura 43 - Desenho do cilindro central.



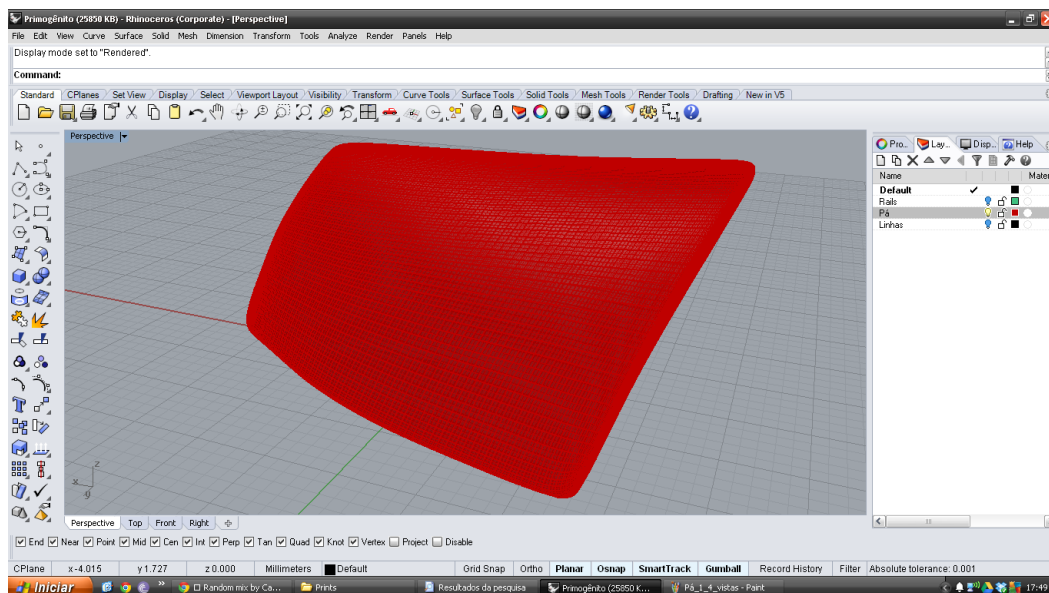
Na figura 44, observa-se como cada ventoinha foi construída, após estarem com suas respectivas texturas, sobre a base padrão.

Figura 44 - Momento de replicação e acoplação das pás.



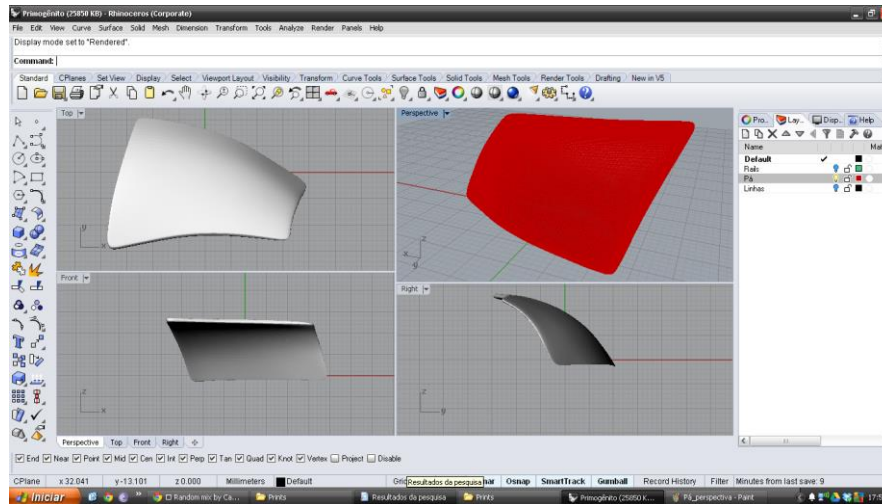
A figura 45 ilustra uma malha da pá base, a partir da qual, foram criadas as texturas. A replicação da mesma em torno do eixo mostrado anteriormente deu origem ao formato idêntico das cinco ventoinhas, apenas diferenciando-se uma das outras de acordo com suas superfícies.

Figura 45 - Construção da pá base.



A curvatura da pá foi modelada considerando a área e as proporções, conforme a figura 46.

Figura 46 - Construção da curvatura da pá.



### 3.3 Processo de Impressão 3D das superfícies

O processo posteriormente desenvolvido dentro do Centro de tecnologia Renato Archer, possibilitou a impressão 3D das cinco peças. A máquina disponibilizada para prototipação rápida das peças foi a impressora Connex350 Multi-Material 3D que através da tecnologia Polyjet, uma forma de fotopolimerização, é capaz de, com a luz alógena UV, promover a cura do material do protótipo, neste caso a resina usada foi a Vero White Full Cure 720 (figura 47).

Figura 47 - Processo de impressão das ventoinhas.



Todos os arquivos foram colocados no software específico da máquina, desta forma, a prototipação ocorreu normalmente, conforme a figura 48. A produção das cinco ventoinhas foi realizada simultaneamente, em uma bandeja específica para não aderir o material de suporte de cada protótipo.

Figura 48 – Processo de impressão e de retirada da máquina.



A retirada de cada protótipo da bandeja interna da máquina foi cuidadosa (figura48), pois a resina que compôs cada ventoinha não está em seu estado de cura total. Todos os protótipos foram levados a uma cabine de lava jato, para a retirada parcial do material de suporte como apresenta a figura 49. Esta etapa é concluída com a ajuda de uma espátula que auxilia a retirada deste material.

Figura 49 - Processo de retirada do material de suporte.



É adequado aguardar cerca de 3 horas antes de manusear os modelos impressos em 3D para permitir a cura completa, a fim de evitar defeitos e fissuras indesejáveis.

### 3.4 Equipamentos utilizados

Este tópico aborda todas as ferramentas e suas características para realização do teste, medindo suas variáveis.

#### 3.4.1 Ventoinha de Teste

A ventoinha EverCool FAN-AL12025M12CA (figura 50) foi o *cooler* escolhido como base para este trabalho, por apresentar uma boa área de pá para ser explorada. Os coolers tem como função principal o arrefecimento do

processador de computadores. As características e especificações do modelo utilizado no experimento são:

- a) Dimensões: 120L x 120W x 25H mm.
- b) Tensão: DC 12V.
- c) Rotação por minuto: 2000 RPM.
- d) Corrente: 0.28A.
- e) Fluxo de Ar: 79.14 CFM.
- f) Ruído: <36 dBA. Entrada: 3.36W.
- g) Tipo de rolamento: rolamento de esferas.

Figura 50 - Ever Cool FAN-AL12025M12CA.(corpo de prova)



### 3.4.2 “Pulmão” de Fumaça

O sistema desenvolvido pelo LETA/UFRGS consiste em um equipamento capaz de produzir fumaça, inserindo-a no túnel aerodinâmico, permitindo assim a visualização do comportamento de corpos aerodinâmicos.

O sistema constitui-se basicamente de uma caixa metálica, denominada “pulmão”, uma resistência elétrica e um ventilador, conforme ilustrado na figura 51. A formação da fumaça é obtida após a queima de um óleo lubrificante utilizando uma resistência elétrica, posteriormente sendo essa fumaça sugada da caixa metálica pelo ventilador e jogada no interior do túnel aerodinâmico através da tubulação de PVC. O objetivo do uso deste equipamento é

compreender como funciona o escoamento de ar dentro do túnel aerodinâmico, podendo inclusive se observar os vórtices.

Figura 51 - Caixa metálica, denominada “pulmão”.



O sistema gerador de fumaça é composto pelos seguintes elementos: Caixa metálica de chapa galvanizada com 3 mm de espessura; Tampa de visualização em acrílico; Ventilador de 12V (Cooler); Fonte com transformador para o cooler; Resistência tipo tubular 220V/600W; Mesa suporte para a resistência feita em perfil quadrado de 20mmx20mm; Pés da mesa de fusível-isolante (cerâmica); Controlador para ligar e desligar a resistência; Bandeja de alumínio para depositar o óleo (figura 52); Conexão de cano PVC; Garrafa para armazenar o óleo com tubulação em mangueira dosadora de soro; Lâmpada.

Figura 52 - Bandeja de alumínio para depositar o óleo (sistema interno do pulmão de fumaça)



Primeiramente, pinga-se o óleo na bandeja sob a qual está inserida a resistência elétrica. Para isso, o óleo que está armazenado em um recipiente plástico flui por gravidade através de uma mangueira fina, onde um dosador controla a quantidade necessária para a queima. A seguir, o sistema é ligado na rede elétrica, com a resistência e o cooler acionados. A resistência é controlada por um controlador que atua com um timer de 60 segundos ligando e desligando para evitar que a resistência queime e que a caixa não sofra um aquecimento demasiado. Por fim, a fumaça obtida pela queima do óleo é aspirada pelo cooler e jogada na tubulação de PVC.

### 3.4.3 Anemômetro

O Anemômetro (figura 53) foi utilizado para medir a velocidade do escoamento de ar que o corpo de prova recebe. O local dele no experimento é fixo e está colocado na parte de entrada do túnel, fornecendo também a temperatura do ar. Devido ao equipamento apresentar desgaste no início dos testes, a ventoinha do anemômetro precisou ser substituída. Algumas informações básicas do aparelho.

Figura 53 - Anemômetro Incoterm.





- a) - Faixa de medição: -10°C a +45°C;
- b) - Faixa de velocidade do escoamento de ar: 0 a 30 m/s;
- c) - Dimensões: 10 x 3,8mm;
- d) - Umidade de trabalho: 90% RH;

Abaixo temos a tabela 2 e 3, referentes ao desempenho e variações do anemômetro.

Tabela 3 - Variação de velocidade do ar. Valores máximos e mínimos alcançados pelo anemômetro.

<b>Unidade</b>	<b>Variação</b>	<b>Resolução</b>	<b>Limiar</b>	<b>Precisão</b>
m/s	0 ~ 30	0,1	0,1	± 5%

Fonte: a autora, (2014).

Tabela 4 - Variação de temperatura. Valores máximos e mínimos alcançados pelo anemômetro.

<b>Unidade</b>	<b>Variação</b>	<b>Resolução</b>	<b>Precisão</b>
°C	-10° ~ 45°	0,2°	±2°

Fonte: a autora, (2014).

### 3.4.5 Multiteste

O multímetro conforme ilustra a figura 54, foi usado para verificar a quantidade de tensão produzida pela ventoinha, formando os gráficos de relação Tensão X Rotação. O multímetro tem diversos tipos de aplicação em ambientes monofásicos, bancadas, hobby. E permite realizar medições de tensão DC e AC, corrente DC, resistência, teste de diodo e transistor.

O instrumento está de acordo com a Categoria I -600V de Sobretensão. Como determinado pela norma de segurança NR-10.

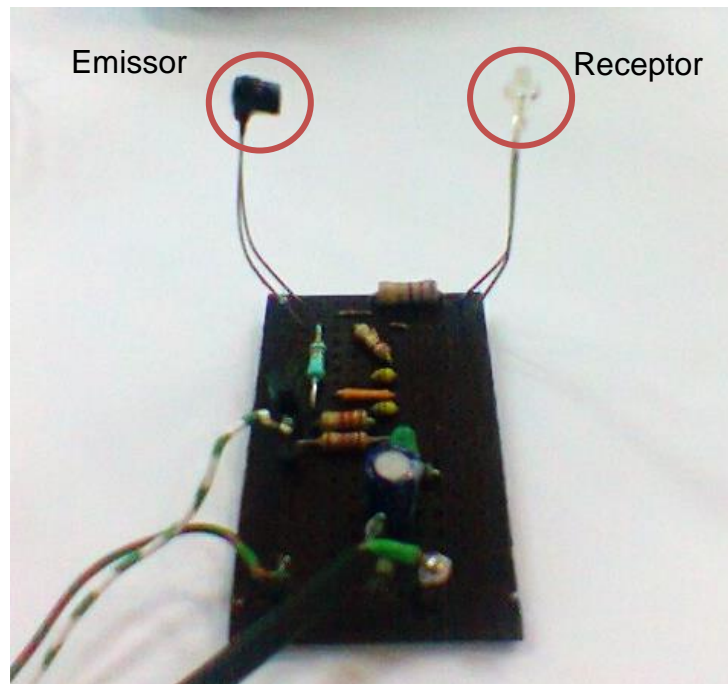
Figura 54 - Multímetro Animpa.



### 3.4.6 Tacômetro

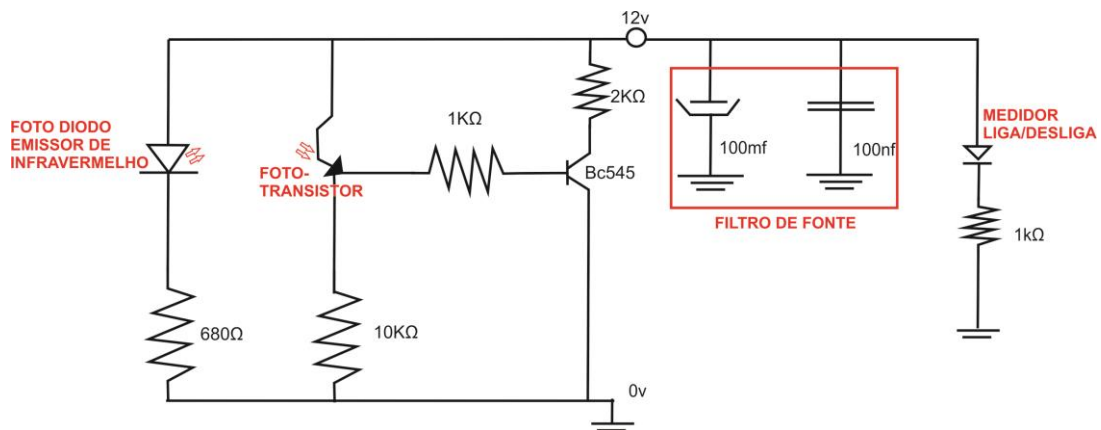
O Contador de voltas, ilustrado na figura 55, foi um equipamento construído pelo técnico da UFRGS João Manoel Tessaro especificamente para colaborar com este trabalho, este equipamento permitiu assegurar a confiabilidade da velocidade do corpo de prova. O equipamento é composto por um emissor de infravermelho e um receptor, o fototransistor. Através de um multímetro é possível ler o número de pulsos por segundo que passam pelo feixe de luz. A ventoinha analisada possui sete pás então o valor do pulso é dividido por sete, multiplicando o resultado por sessenta obtêm-se o número de rotações por minuto que o componente analisado gera.

Figura 55 - Contador de Voltas.



Na figura 56 é apresentado o circuito do equipamento, ilustrando o funcionamento do mesmo.

Figura 56 - Circuito do Contador de Voltas.



### 3.4.7 VarivoltVariac

O Variac ilustrado na figura 57 foi emprestado pelo laboratório de instrumentação da escola de engenharia mecânica da UFRGS e foi usado para ligar o túnel aerodinâmico, ou seja, para regular a tensão e defini-la em relação

a uma velocidade. Desta forma podemos definir os gráficos de funcionamento do experimento com maior precisão.

Figura 57 - Varivolt Variac.



As informações básicas sobre o produto são:

- a) Entrada: 115V
- b) Saída: 0~135V
- c) Potencia: 1,5KVA

### 3.4.8 Túnel Aerodinâmico

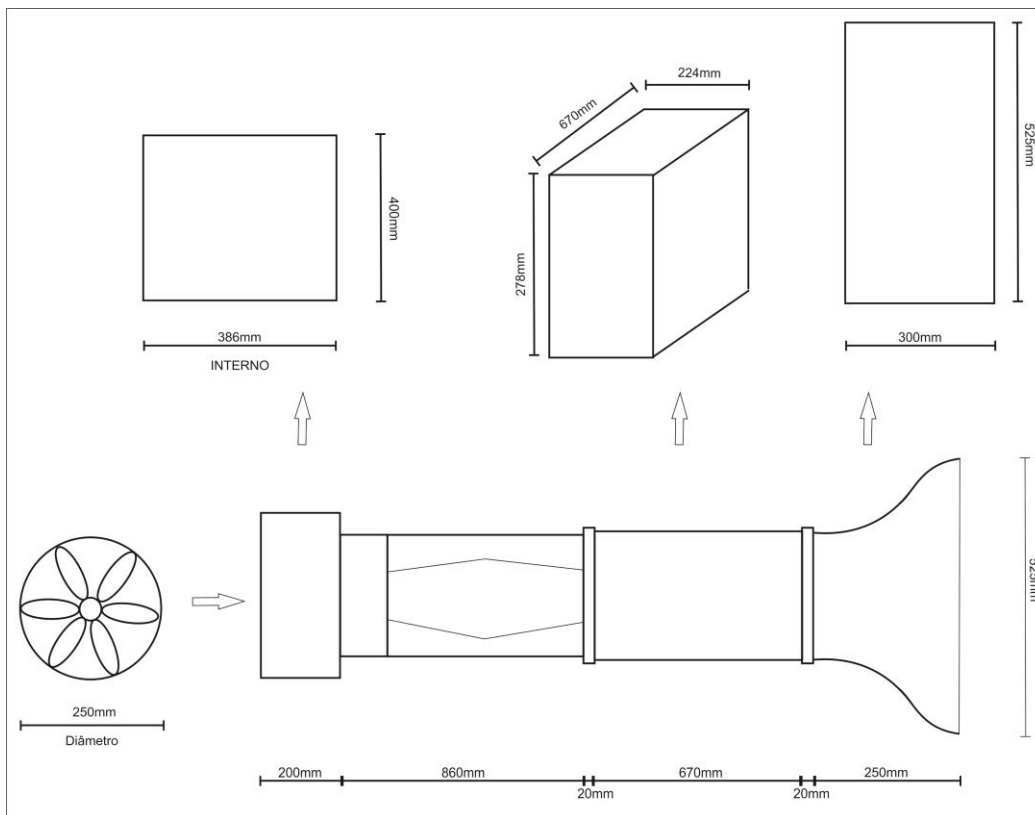
Para a realização do experimento foi utilizado o túnel aerodinâmico desenvolvido no LdSM/UFRGS. O túnel está localizado na Oficina de Modelos, Protótipos e Maquetes da Faculdade de Arquitetura (FA/UFRGS) como exposto na Figura 58. É um túnel aerodinâmico de pequeno porte, porém pode trazer resultados para este trabalho, visto que o corpo de prova trabalhado também é de pequeno porte.

Figura 58 - Túnel aerodinâmico.



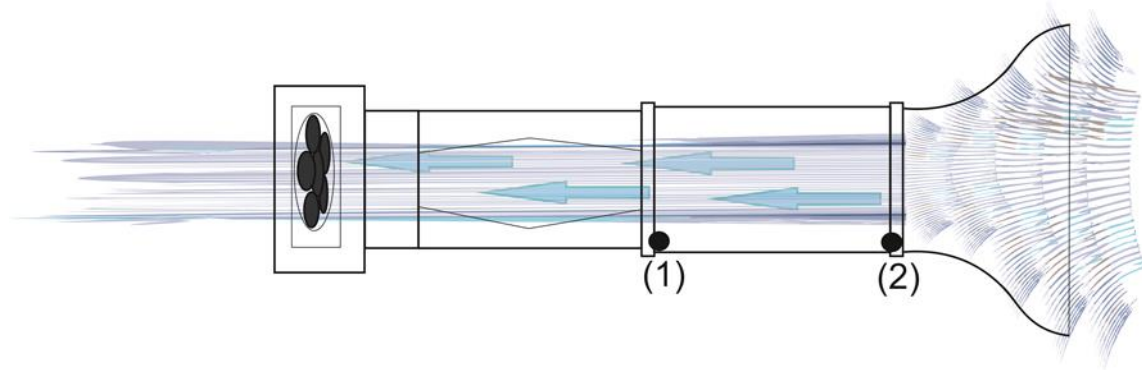
As dimensões do túnel estão especificadas na figura 59, os outros equipamentos listados no trabalho são utilizados juntamente com o túnel aerodinâmico durante a realização dos ensaios. Esta figura pode ser melhor visualizada no apêndice 2.

Figura 59 - Dimensões do Túnel aerodinâmico.



A dinâmica do escoamento de ar no túnel é inversa, ou seja, existe uma ventoinha que atrai o escoamento de ar para dentro do tubo, produzindo uma velocidade que pode ser medida (Figura 60).

Figura 60 - Escoamento no interior do túnel aerodinâmico.



O escoamento de ar primeiramente passa pelo anemômetro (2) e, 67 cm adiante, se choca com o corpo de prova (1). Ambos estão fixados em uma mesma altura nos momentos de medição, ou seja, o ensaio é feito considerando este efeito de bloqueio.

## **4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS**

Neste capítulo, são apresentadas as análises dos ensaios e suas interpretações. Os resultados apresentados consistem em verificar qual superfície se mostrou mais eficiente e qual o ganho de eficiência das outras superfícies criadas.

### **4.1 Ensaios**

A modelagem das superfícies sobre a ventoinha e os testes manuais necessários para o entendimento dos fenômenos inerentes ao objeto do trabalho (ventoinha com pás texturizadas) foram realizadas com o túnel aerodinâmico localizado na oficina do prédio de arquitetura da UFRGS.

A utilização do túnel aerodinâmico foi escolhida por se tratar de uma ferramenta eficiente para testes de estruturas submetidas a cargas do escoamento de ar. Os passos necessários para se trabalhar com esse método podem ser entendidos como:

- a) criação do modelo;
- b) Variação destes modelos, no caso a superfície das pás.
- c) Análise dos resultados e comparação;
- d) Modificações, atualizações e generalização de resultados.

Para a criação de um modelo ideal de superfície é necessário ter uma ideia conceitual com intenções de atendimento aos requisitos de projeto. Neste caso é necessário associar os conhecimentos sobre o design de superfície e da engenharia.

Geralmente as superfícies são produzidas para utilização estética. Neste caso, essas superfícies também possuem uma funcionalidade, além de provavelmente tornarem o objeto mais interessante do ponto de vista estético. Na metodologia desenvolvida para a pesquisa, as superfícies foram definidas por parâmetros como velocidade do escoamento de ar gerado pelo túnel aerodinâmico, em relação a velocidade do corpo de prova.

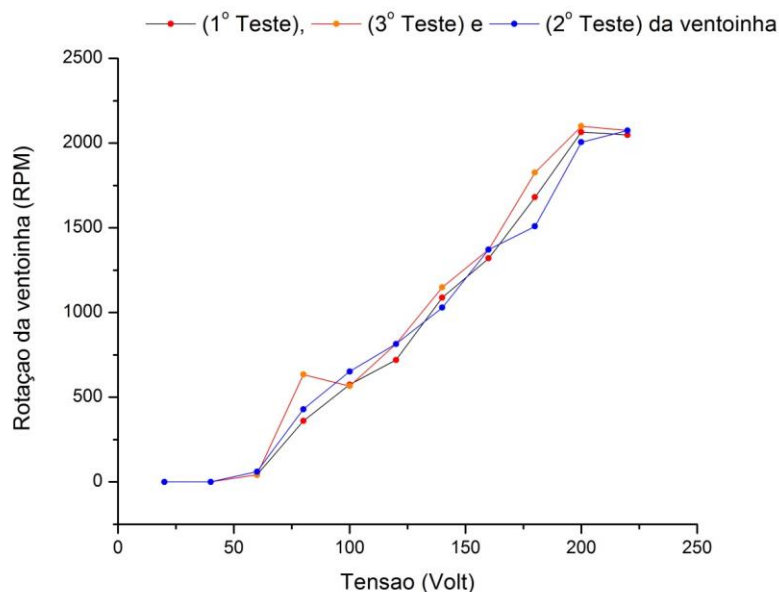
No momento preliminar da pesquisa, a instrumentação apenas permitiu medir e conhecer os gráficos que caracterizam o funcionamento do túnel e das

ventoinhas utilizadas, tanto a ventoinha do corpo de prova como a ventoinha geradora de escoamento para o túnel.

Os testes com os protótipos foram feitos posteriormente em um sistema comparativo para a coleta inicial de dados. O gráfico 6 demonstra como a ventoinha, escolhida como o modelo base para ser copiada, se comporta no túnel aerodinâmico de acordo com a tensão controlada pelo Variac.

Observa-se no gráfico 6 que o momento de partida do corpo começa entre 50,1 volts e 50,6 volts. Esta é uma medida importante, principalmente no ponto de vista de que essa tensão precisa ser diminuída para a obtenção de ventoinhas mais sensíveis ao escoamento de ar. Este ensaio foi realizado para prever o comportamento do protótipo que foi posteriormente construído em cinco versões de texturas diferentes.

Gráfico6 - Representação gráfica dos resultados dos testes com o corpo de prova (para reconhecimento do túnel).



## 4.2 Número de Reynolds do Túnel aerodinâmico

Para calcular o número de Reynolds através de um túnel aerodinâmico de secção retangular, foi necessário utilizar um diâmetro equivalente.

Algumas aplicações em engenharia também envolvem transporte por convecção em tubos não circulares. Pelo menos para uma primeira



aproximação, contudo, muito dos resultados de tubos circulares podem ser aplicados com a utilização do diâmetro efetivo como o comprimento característico. Ele é denominado diâmetro equivalente e é definido como visto na equação 1.

$$\text{Equação (1): } D_e = \frac{4 * A_c}{P}$$

Onde ( $A_c$ ) e ( $P$ ) são área da seção transversal do escoamento e o perímetro de contato com o escoamento de ar, respectivamente. É esse diâmetro que deve ser utilizado para se calcular o parâmetro de Reynolds como temos na equação 2.

$$\text{Equação (2): } R_e = \frac{V * D_e}{\nu}$$

Onde ( $V$ ) é a velocidade do escoamento de ar em m/s, ( $D_e$ ) é diâmetro equivalente e ( $\nu$ ) é a viscosidade cinemática do ar na temperatura do teste. Nos ensaios foi usada uma temperatura média de 23,4 °C, que corresponde a uma viscosidade cinemática de  $15,57 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (INCROPERA E DEWITT, 1998).

Dessa forma, considerando as dimensões do túnel aerodinâmico observa-se um diâmetro equivalente de 0,2813 m, o que resulta na equação 3 em número de Reynolds:

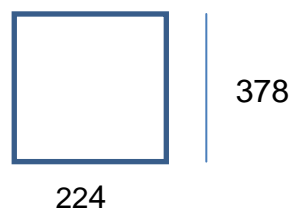
$$\text{Equação (3): } D_e = \frac{4 * A_c}{P}$$

$$\text{Área} = 0,0846 \text{ m}^2$$

$$\text{Perímetro} = 1,204 \text{ m}$$

$$D_e = \frac{4 * 0,0846(\text{m}^2)}{1,204(\text{m})} = 0,2813(\text{m})$$

$$\text{Reynolds } R_e = \frac{V * D_e}{\nu}$$



Seção retangular do túnel aerodinâmico

Para calcular o número de Reynolds da secção transversal do túnel aerodinâmico foi utilizada a equação 4.

$$\text{Equação (4): } R_e = \frac{V \left( \frac{m}{s} \right) * 0,2813(m)}{15,57 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}}$$

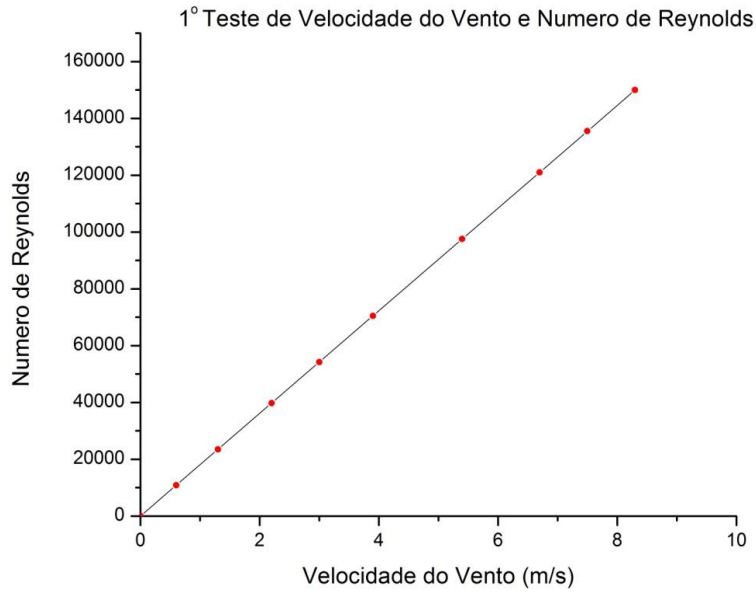
Cruzando esses dados foi possível construir curvas que caracterizam o comportamento do túnel aerodinâmico durante o ensaio com a ventoinha conforme ilustram os gráficos 7,8 e 9. É importante considerar que os testes listados a seguir foram realizados preliminarmente para estruturar um método de medição que será idêntico aos apresentados nas tabelas 5,6 e 7.

Essa fase prepara o túnel, assim como os equipamentos, para avaliar metodologicamente as ventoinhas prototipadas e texturizadas posteriormente.

Tabela 5- 1º teste de levantamento de dados

1º Teste Medindo a Rotação da Ventoinha				
Tensão (Volts)	Ventoinha (RPM)	Velocidade do escoamento de ar (m/s)	Temperatura (°C)	Reynolds (Re)
20	0	0	23,7	0
40	0	0	23,8	0
60	43	0,6	23,8	1,084*10 <sup>4</sup>
80	360	1,3	23,7	2,349*10 <sup>4</sup>
100	574	2,2	23,6	3,975*10 <sup>4</sup>
120	720	3,0	23,7	5,420*10 <sup>4</sup>
140	1088	3,9	23,7	7,046*10 <sup>4</sup>
160	1320	5,4	23,4	9,756*10 <sup>4</sup>
180	1654	6,7	23,2	1,210*10 <sup>5</sup>
200	2066	7,5	23,3	1,355*10 <sup>5</sup>
220	2048	8,3	23,3	1,500*10 <sup>5</sup>

Gráfico7 - Curva para o 1° Teste.

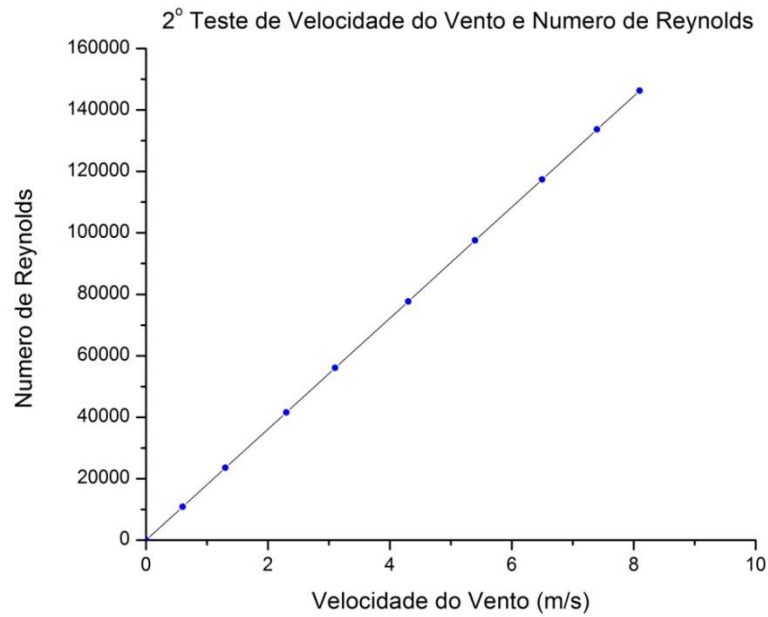


Nesta etapa temos a 2° vez que os testes foram aplicados.

Tabela 6 - 2° Teste de levantamento de dados.

2° Teste Medindo a Rotação da Ventoinha				
Tensão (Volts)	Ventoinha (RPM)	Velocidade do escoamento de ar (m/s)	Temperatura (°C)	Reynolds (Re)
20	0	0	23,7	0
40	0	0	23,8	0
60	43	0,6	23,8	$1,084 \cdot 10^4$
80	403	1,3	23,7	$2,349 \cdot 10^4$
100	568	2,3	23,6	$4,155 \cdot 10^4$
120	814	3,1	23,7	$5,601 \cdot 10^4$
140	1148	4,3	23,7	$7,769 \cdot 10^4$
160	1500	5,4	23,4	$9,756 \cdot 10^4$
180	1826	6,5	23,2	$1,174 \cdot 10^5$
200	2100	7,4	23,3	$1,337 \cdot 10^5$
220	2074	8,1	23,3	$1,463 \cdot 10^5$

Gráfico8 - Curva gerada a partir do 2º teste.

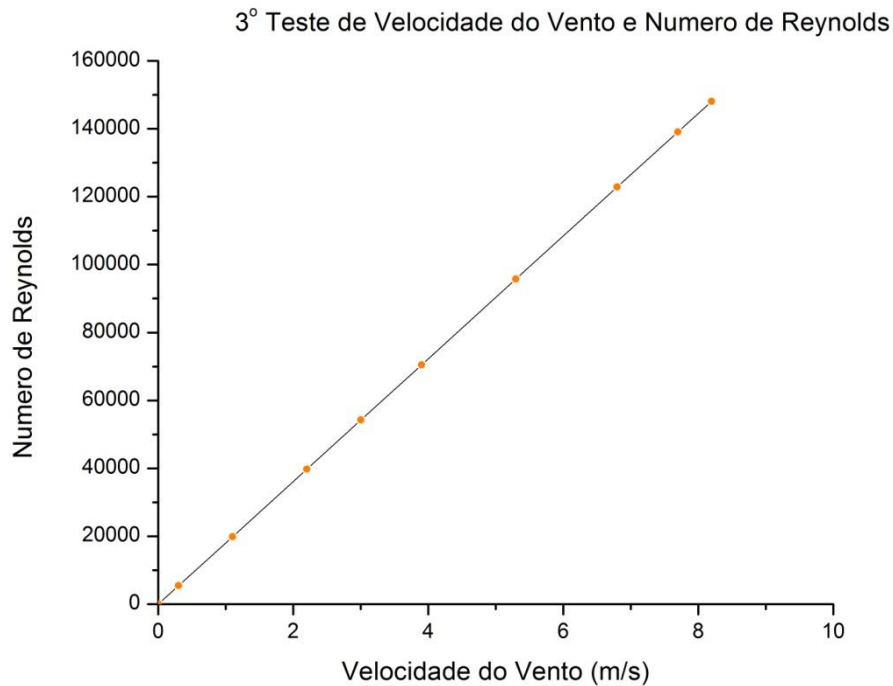


Os testes como podemos observar foram realizados 3 vezes, para determinar o comportamento do túnel aerodinâmico em relação a ventoinha corpo de prova, escolhida como modelo.

Tabela 7 - 3º Teste de levantamento de dados.

3º Teste Medindo a Rotação da Ventoinha				
Tensão (Volts)	Ventoinha (RPM)	Velocidade do escoamento de ar (m/s)	Temperatura (°C)	Reynolds (Re)
20	0	0	23,7	0
40	0	0	23,8	0
60	60	0,3	23,8	$5,420 \cdot 10^3$
80	428	1,1	23,7	$1,987 \cdot 10^4$
100	651	2,2	23,6	$3,975 \cdot 10^4$
120	814	3,0	23,7	$5,420 \cdot 10^4$
140	1028	3,9	23,7	$7,046 \cdot 10^4$
160	1371	5,3	23,4	$9,575 \cdot 10^4$
180	1508	6,8	23,2	$1,229 \cdot 10^5$
200	2006	7,7	23,3	$1,391 \cdot 10^5$
220	2074	8,2	23,3	$1,481 \cdot 10^5$

Gráfico 9 - Curva a partir do 3º teste.

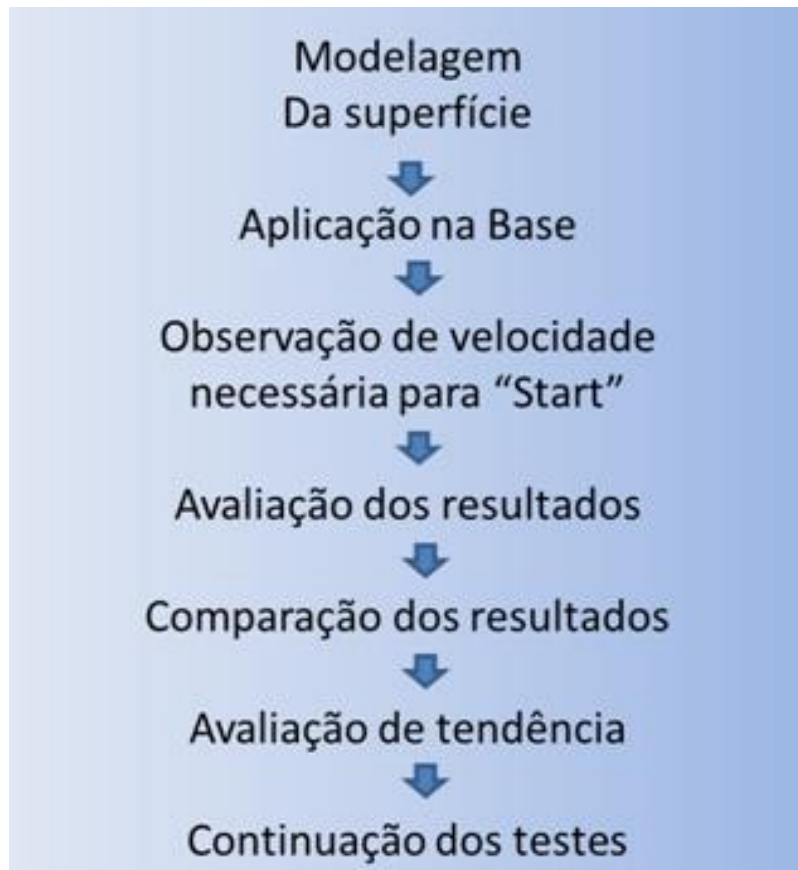


Pode-se observar que as curvas tem um comportamento linear, isso ocorre porque o número de Reynolds é diretamente proporcional à velocidade do escoamento de ar, ainda o diâmetro equivalente e a viscosidade permanecem constantes.

Para Kaminski (2008), a análise dos resultados é a parte mais importante do procedimento. É quando o projetista ou usuário se depara com os resultados apresentados. Essa análise pode ser feita de duas formas: visual e matemática. A análise visual pode dar indícios sobre regiões de tensões máximas, ou deformações da geometria em decorrência das cargas. A análise matemática pode ser aplicada para relacionar os valores limites de resistência dos materiais conhecidos em tabelas ou normas com os obtidos na simulação.

Esse processo todo pode ser repetido inúmeras vezes, com inúmeras modificações nos parâmetros e variáveis inerentes ao objeto simulado. A figura 61 apresenta um fluxograma para análise de uma superfície modelada para esta pesquisa.

Figura 61 - Fluxograma Simples de execução dos Testes.



Este modelo representa um sistema criado, iniciando a partir de uma geometria pronta e inalterável como base (não quer dizer que a espessura do material da base não possa ser alterada posteriormente no software quando for fabricada na fase final da pesquisa).

Definem-se as condições mínimas e as forças as quais estará submetido o corpo de prova. Faz-se a simulação no túnel aerodinâmico e se obtém resultado do comportamento da ventoinha. A simulação pode ser feita com análise do comportamento da superfície empregada no corpo de prova. Se a superfície falhar, altera-se a espessura, número de camadas ou a estrutura total da superfície e retorna-se à simulação. Este foi o planejamento feito anteriormente à prototipagem dos modelos, momento em que as texturas estavam sendo realizadas com massa, para então serem escolhidas as que seriam prototipadas.

### 4.3 Avaliação da qualidade das superfícies

Após a determinação dos parâmetros, foi necessário encontrar uma superfície adequada e eficiente para o modelo. A criação destas superfícies consiste em uma das principais fases da análise pelo método que utiliza o túnel aerodinâmico.

No túnel, onde foram realizadas as simulações, as superfícies devem ser associadas à geometria da pá para incorporar as cargas e condições de seu contorno. As idéias para os testes com os protótipos foram preliminarmente observadas nos grupos a seguir. As superfícies inicialmente foram testadas utilizando-se massa para modelar escolar e papel adesivo comum nos primeiros grupos. Essa massa corresponde a 0,8g medidas em uma balança de precisão e foi distribuída em cada pá igualmente. Desta forma, o peso ficou distribuído evitando maior peso em algumas pás.

Na figura 62, a folha de adesivo foi cortada a laser para o primeiro grupo de texturas. A textura foi feita através de adesivos cortados a laser na máquina localizada na oficina de arquitetura da UFRGS, obtendo-se um resultado conforme mostra a figura 63.




Figura 62 - Corte a laser.



A textura B foi pensada remetendo à superfície da bola de golfe explicada anteriormente. Na textura A, foi feita uma tentativa utilizando como referência a escama de peixe do tipo ciclóide, normalmente arredondadas e

lisas, comuns em peixes de pequeno porte, que diminui o atrito com a água. Todas as texturas foram feitas utilizando como comparativo uma textura padrão, ou seja, com papel adesivo colado em todas as pás, para depois este material ser recolocado em todas as pás sob forma texturizada.




Figura 63 - 1º grupo de texturas em adesivo.

<p>Ventoinha Padrão (Pás lisas)</p>	
<p>Variação A</p>	
<p>Variação B</p>	

Na figura 64, está ilustrado o segundo grupo de textura feito com massa de modelar, somente 0,8g de massa modelada sobre cada pá foi utilizada para minimizar o desbalanceamento. Foi colada a massa nos pontos mais altos das pás, ou seja, local onde o escoamento de ar toca primeiro e supostamente teria mais pressão. Na textura 2 do grupo, essa massa aparece com furos na intenção de variar a textura 1.



Figura 64 - 2º grupo de texturas em massa de modelar.

Ventoinha Padrão (Pás lisas)	 <p>A photograph of a standard fan with eight blue, smooth blades radiating from a central hub. The word "Padrão" is written in red in the bottom left corner of the image.</p>
Variação 1	 <p>A photograph of a fan with eight blue blades that have a textured, dimpled surface. A small red number "1" is in the bottom left corner.</p>
Variação 2	 <p>A photograph of a fan with eight blue blades that have a perforated or dotted texture. A small red number "2" is in the bottom left corner.</p>

Na figura 65, o terceiro grupo de texturas apresenta modificações na estrutura e na posição em que está colocada a massa de modelar na pá. Na textura 1, a textura remete à superfície da bola de golfe com efeito invertido, produzindo pequenos corredores de vento entre as bolas. Na textura 2 do grupo, houve uma variação na forma da massa criando pequenos túneis de escoamento de ar em cada pá. Na textura 4 e na textura 5 houve uma variação de posição na massa aplicada para verificar se o peso concentrado influenciaria na eficiência.

Estas texturas foram produzidas, porém não foram metodologicamente testadas no túnel aerodinâmico, visto que os testes só foram validados depois de realizados com os protótipos fabricados por prototipagem rápida, com as respectivas texturas escolhidas através destes ensaios com massa de modelar. A intenção destes ensaios iniciais foi apenas observar o comportamento do túnel e das possibilidades de texturas.

Figura 65 - 3º grupo de texturas.

<p>Ventoinha Padrão (Pás lisas)</p>	
<p>Variação 1</p>	
<p>Variação 2</p>	
<p>Variação 3</p>	
<p>Variação 4</p>	

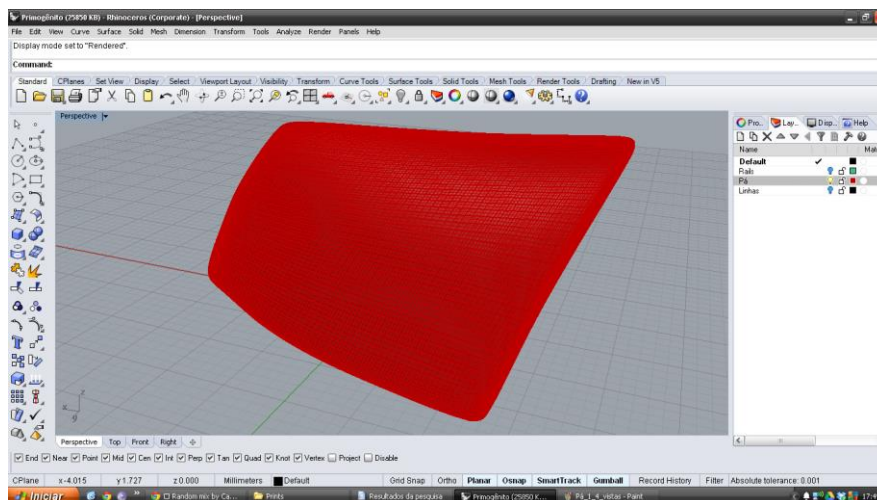
## 4.4 Ensaios Finais

Neste tópico são apresentados os testes realizados com os protótipos de cada ventoinha com sua respectiva textura. Estas texturas puderam ser selecionadas a partir das observações com os testes comparativos, feitos com massa de modelar na etapa preliminar desta pesquisa. Os ensaios deste capítulo foram validados para concluírem os resultados finais, com base na melhor precisão em decorrência da prototipagem dos modelos.

### 4.4.1 Ventoinha A

A Ventoinha denominada como A, é a ventoinha padrão. Com textura lisa, sua função está em servir como padrão para a análise comparativa (figura 66).

Figura 66- Modelagem 3D da ventoinha A.



Após ser desenhada no programa Rhinoceros, ela foi prototipada. Esta ventoinha foi o padrão de comparação entre todas as outras, representando uma ventoinha sem o artifício da textura, como as que se obtêm com facilidade no mercado. A máquina de prototipagem, o tipo de impressão e a resina utilizada nos modelos, foram escolhidas de tal forma a preservar a superfície lisa da ventoinha A, sem rugosidades formadas por sulcos ou marcas deixadas na superfície da peça pelo processo de fabricação Kindlein (2006). Desta forma houve empenho para minimizar ao máximo dentro deste tipo de tecnologia a

porosidade ou outro fator que descaracterizasse essa superfície lisa. A figura 67 ilustra a pá após a prototipagem.

Figura 67 - Ventoinha lisa.



Em relação aos resultados obtidos durante o ensaio, a ventoinha Lisa, foi a 3<sup>a</sup> mais sensível ao escoamento de ar, ou seja, teve seus movimentos iniciais atrasados em relação a duas ventoinhas de mesma massa, porém com texturas (todas as ventoinhas possuíam a mesma massa no momento do ensaio).

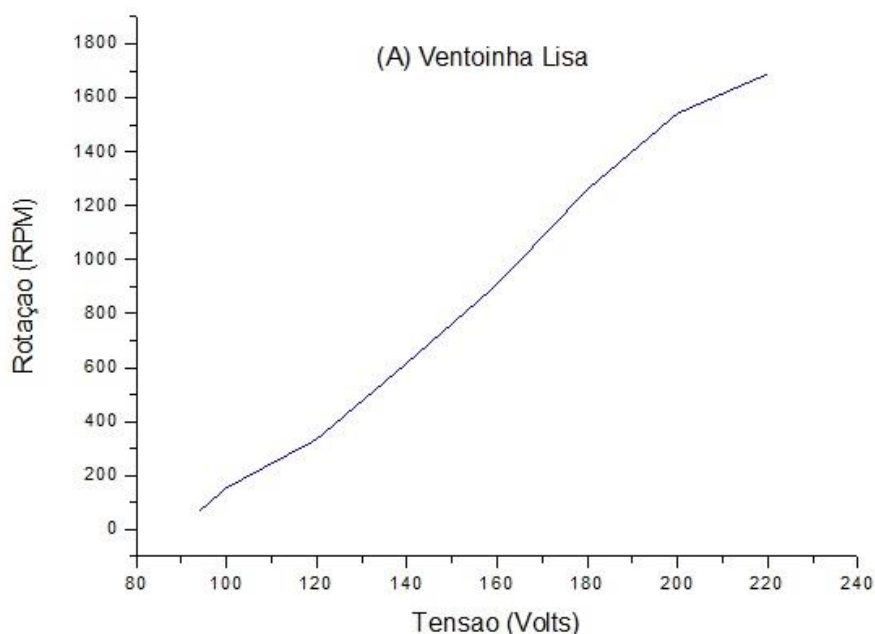
A ventoinha lisa teve melhor resultado em relação a sua velocidade máxima a 220 V chegando em 1688.57 rpm, a 2<sup>a</sup> maior velocidade. A textura lisa foi menos eficiente em comparação com a ventoinha E, com diferença de 77rpm. Esses dados comprovam que a textura lisa, como foi fundamentada pelo referencial teórico desta pesquisa, não é a mais eficiente. Os dados retirados do teste com esse modelo estão ilustrados na tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da ventoinha A.

(A) VENTONINHA LISA				
Tensão (V)	RPM	Vel. do escoamento de ar (m/s) 1º Teste	Temp. (oC) 1º Teste	Reynolds
60				
94	68,57	0,9	19,6	16655,92
100	154,28	1,1	19,4	20357,23
120	334,28	2,2	19,3	40714,47
140	617,14	2,7	19,2	49967,76
160	908,57	4	19,2	74026,31
180	1260	5,3	19,2	98084,86
200	1542,85	6,3	19,3	116591,4474
220	1688,57	7	19,3	129546,0526
Média de Temp.			19,3125	

Como observamos no gráfico 10, este ensaio apresenta uma curva de desempenho em relação à textura lisa, em que se observa o número de rotações por minuto feitas em todas as voltagens submetidas no ensaio. Todas as texturas foram testadas nas mesmas condições, com a mesma massa, de 17,674g.

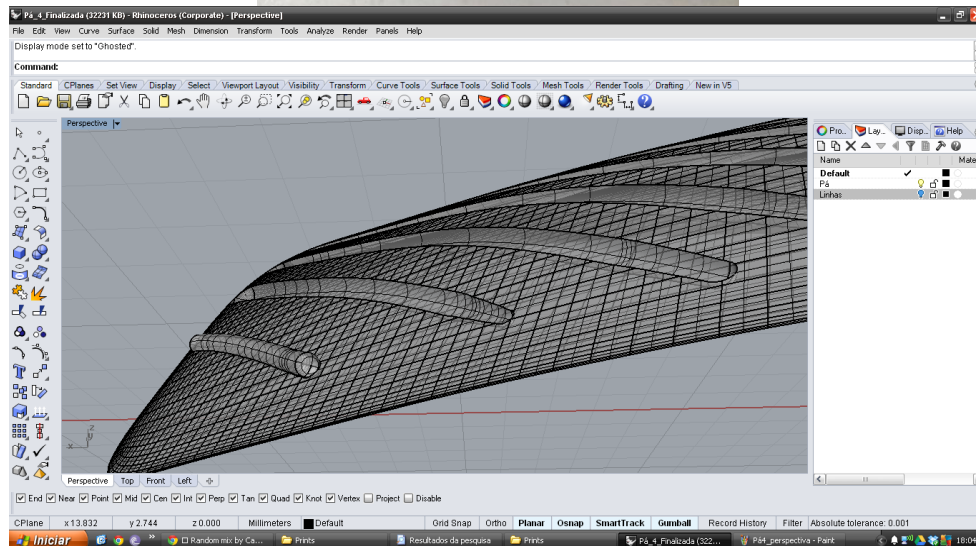
Gráfico10 - Gráfico indicativo da ventoinha A.



## 4.4.2 Ventoinha B

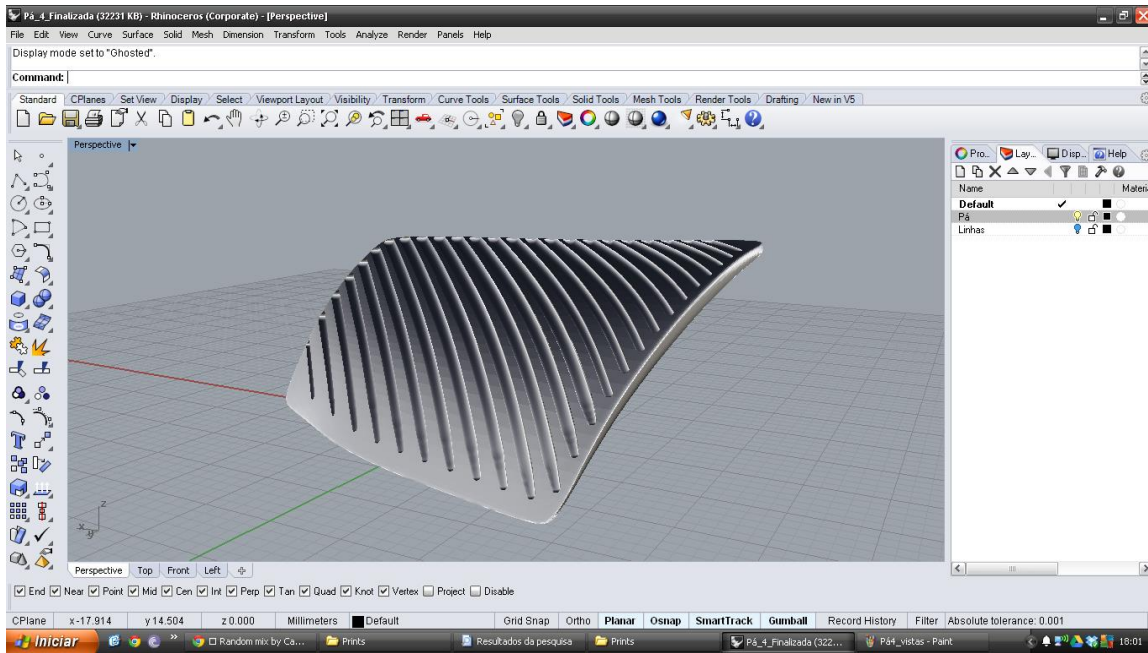
Na criação desta textura, a ideia foi pensada a partir de animais que voam, ou seja, começamos a nos aproximar do que resultaria na textura mais eficiente desta pesquisa, a textura E. A partir dos animais possuem asas e também possuem penas, foi apropriado pensar em como simular essa textura de penas em uma pá. Desta forma ao invés de criarmos a forma das penas, criamos os sulcos, que seriam os espaços entre as penas pelos quais passariam o fluxo de ar sobre a superfície da asa. Como observa-se na figura 68, o modelo foi construído com ranhuras na diagonal.

Figura 68 - Modelagem 3D da ventoinha B.



Como podemos observar na figura 69, a ferramenta do software Rhinoceros (disponível em versão estudante no LdSM/UFRGS) utilizada neste processo, foi a operação booleana, capaz de subtrair volume do modelo da base.

Figura 69–Operação boleana realizada na textura B.



A prototipagem rápida deste modelo precisou ser refeita, em função de sua fina espessura. Posteriormente, atingiu-se uma superfície mais rígida capaz de suportar os ensaios e com mesma massa dos outros modelos. O modelo de textura é ilustrado pela figura 70.

Figura 70 - Protótipo de ventoinha B.



A ventoinha B atingiu a maior sensibilidade ao escoamento de ar nos ensaios, iniciando seus movimentos em 90,8 V conforme indica a tabela 9. No caso de uma ventoinha que necessita iniciar as rotações sem alimentação elétrica, dentre os modelos testados, este seria o mais eficiente. Além de possibilitar a retirada de volume da estrutura de superfície, tornando-a mais leve.

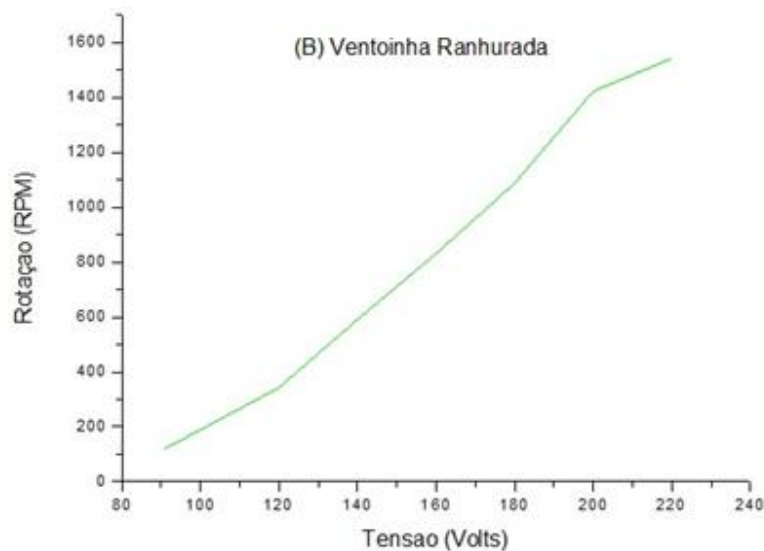
Tabela 9 - Resultados ventoinha B

(B) VENTONHA RANHURADA				
Tensão (V)	RPM	Vel. do escoamento de ar (m/s) 1º Teste	Temp. (oC) 1º Teste	REYNOLDS
60				
90,8	120	0,7	19,8	12946,088
100	188,57	1,1	19,7	20343,852
120	342,85	2	19,6	36988,823
140	591,42	2,7	19,4	49934,911
160	831,42	3,9	19,2	72128,205
180	1088,57	5,1	19,3	94321,499
200	1422,85	6,3	19,2	116514,792
220	1542,85	7	19,2	129460,881
Média de Temp.			19,425	

Na tabela 9 a curva de desempenho da textura B apresenta a menor velocidade a 220 V. Essa textura é bastante sensível ao escoamento de ar, porém não demonstrou capacidade para chegar a altas velocidades, tendo rotação máxima de 1542,85 rpm. Isso significa 146 rpm a menos do que a ventoinha padrão lisa conforme o gráfico 11 ilustra.



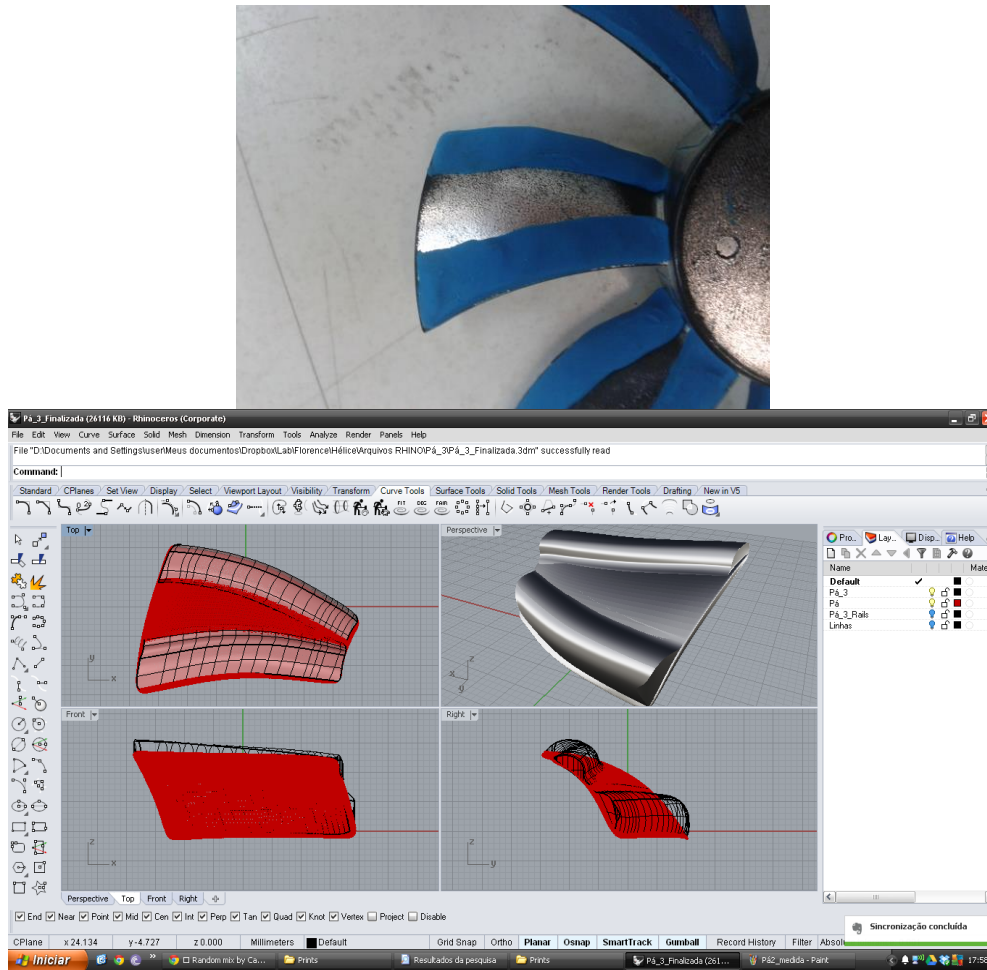
Gráfico 11 - Curva de desempenho da textura B.



#### 4.4.3 Ventoinha C

Para a construção desse modelo utilizou-se um estudo já apresentado nesta pesquisa, que descreve e analisa a forma do corpo de um falcão peregrino durante um voo de ataque a presa, momento em que seu corpo assume formas bastante relevantes para estudos de aerodinâmica e atinge as velocidades mais altas. Verificamos os volumes principais da asa de um falcão peregrino e consideramos dois volumes principais. O volume do ângulo de ataque da asa do falcão e o volume do ângulo de saída (referente às partes da frente e de trás da asa do falcão respectivamente). Neste caso, a ventoinha funcionou como um indicador para analisarmos se, utilizando o modelo de uma asa, será possível chegar a resultados significativos. Na figura 71, foi ilustrada a modelagem das duas fitas anexadas a pá, representando os principais pontos de uma asa.

Figura 71 - Modelagem da textura da ventoinha C.



Na figura 72 podemos observar o resultado da prototipação rápida, após o projeto no computador.

Figura 72 - Protótipo de ventoinha C.



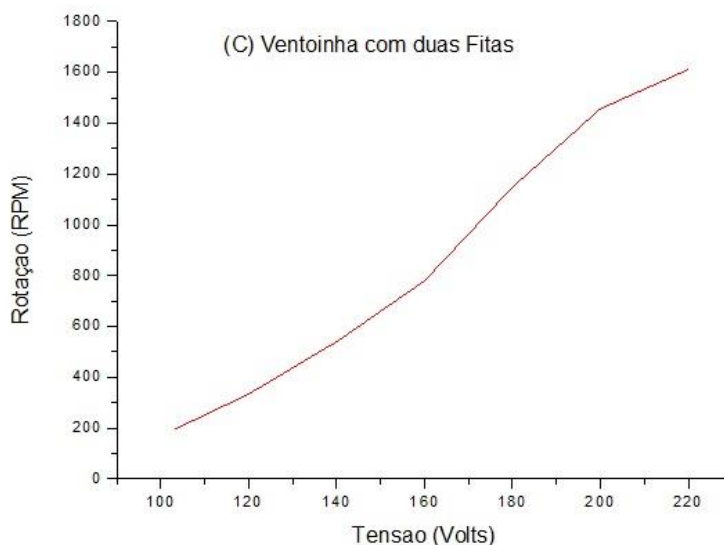
Os resultados apresentados pela ventoinha C mostraram-se como sendo a superfície menos eficiente, a textura foi a menos sensível ao escoamento de ar entre as testadas e teve a 3ª maior rotação por minuto a 220V.

Tabela 10 - Tabela de resultados da ventoinha C.

(C) VENTONHA DUAS FITAS				
Tensão (V)	RPM	Vel. do escoamento de ar (m/s) 1º Teste	Temp. (oC) 1º Teste	REYNOLDS
60				
80				
103,4	197,14	1,1	19,9	20317,13723
120	334,28	2	19,7	36940,24951
140	540	2,7	19,5	49869,33684
160	780	3,9	19,5	72033,48654
180	1148,5	5,3	19,6	97891,6612
200	1457,14	6,5	19,7	120055,8109
220	1611,42	7,1	19,7	131137,8858
Média de Temp.			19,65714286	

Pôde-se constatar que esta textura não foi mais eficiente que a textura padrão lisa, tendo um diferença de 10,4 V em relação a ventoinha lisa e de 77 rpm a menos de rotação. Conforme a tabela 10 e o gráfico 12.

Gráfico 12 - Indicativo de resultados da ventoinha C.

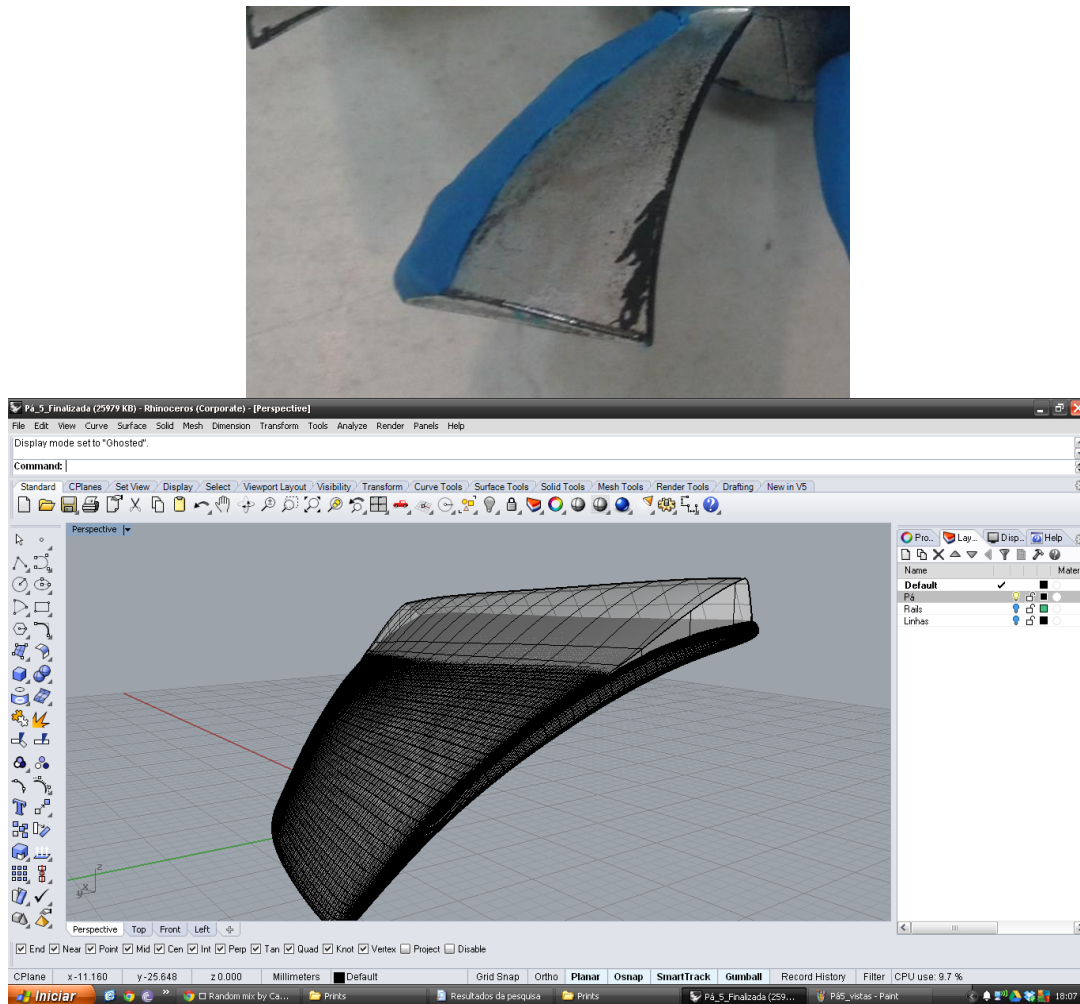


#### 4.4.4 Ventoinha D

Neste caso, foi desenvolvido um modelo de textura com características mais precisas com relação ao estudo sobre o corpo e os ângulos que o estudo sobre o falcão peregrino apresentou. No estudo, o ângulo de  $5^\circ$  foi apontado como o ângulo de ataque do corpo do falcão peregrino, quando o mesmo atinge a maior velocidade durante o mergulho.

Este mesmo ângulo foi proposto para o ângulo de ataque da pá, na figura 73 observa-se o modelo sendo projetado, apenas com o ângulo acrescentado.

Figura 73 - Modelagem do ângulo de  $5^\circ$  da ventoinha D.



Na figura 74, está ilustrado o protótipo da ventoinha D. Nos ensaios o ângulo de ataque de cinco graus sem auxílio de um ângulo de saída, mostrou-

se pouco eficiente. A ventoinha D foi a 4º menos veloz entre os cinco modelos, também a 4º menos sensível ao escoamento de ar.

Figura 74 - Protótipo da ventoinha D.



Na tabela 11, temos os dados do ensaio que evidenciam o atraso de 8,9 V em relação a ventoinha lisa e 111rpm a menos de velocidade também em relação a lisa.

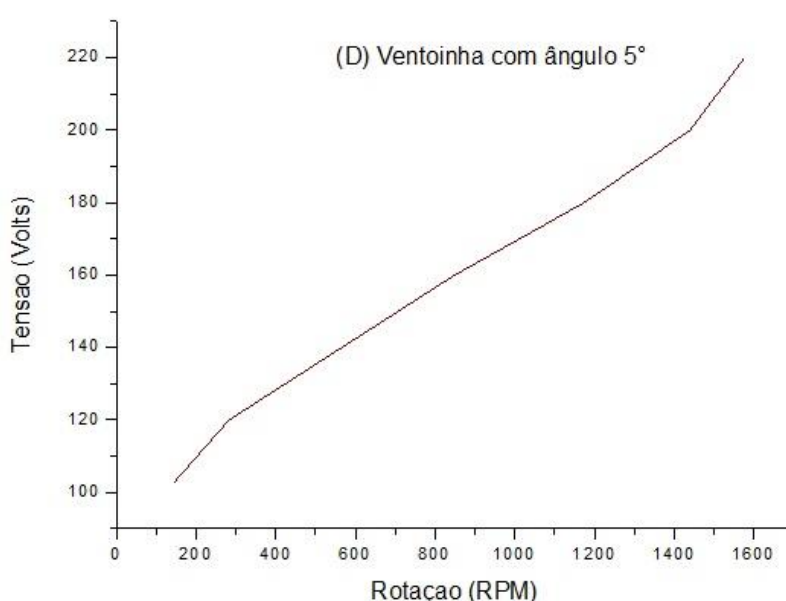
Tabela 11 - Resultados da ventoinha D.

(D) VENTONHA ÂNGULO 5°				
Tensão (V)	RPM	Vel. do escoamento de ar (m/s) 1º Teste	Temp. (oC) 1º Teste	REYNOLDS
60				
80				
102,9	145,71	1,2	19,7	22193,293
120	282,85	2,1	19,6	38838,264
140	565,71	2,9	19,4	53633,793
160	848,57	3,9	19,3	72128,205
180	1174,24	5,3	19,4	98020,381
200	1440	6,4	19,2	118364,234
220	1577,14	7	19,4	129460,881
Média de Temp.			19,4285714	

No tabela 11 e no gráfico 13, podemos observar que o ângulo de 5 graus não foi eficiente utilizado separadamente. Assim como a ventoinha C de dois volumes, a ventoinha D demonstrou a falta de equilíbrio entre os lados da pá.

No estudo sobre o falcão peregrino, o corpo da ave tem ângulo de 5° quando atinge maior velocidade, porém, ao mesmo tempo foi indicada a textura que envolve o corpo do animal, inclusive um estudo de como se comporta o fluxo de ar ao redor do corpo texturizado por penas durante o voo.

Gráfico13 - Gráfico indicativo de resultados da ventoinha D.

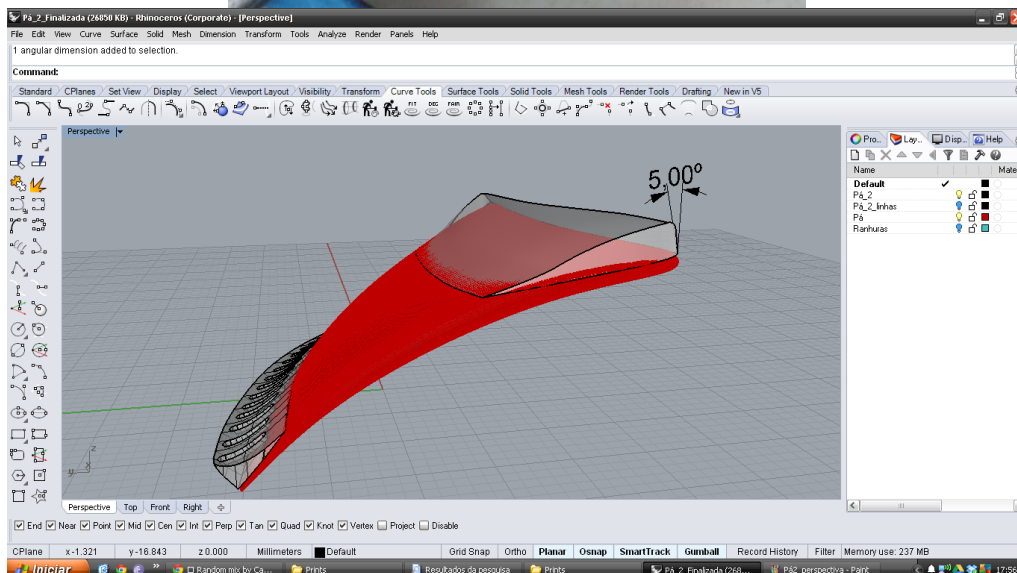


#### 4.4.5 Ventoinha E

Baseando-se nos dois ensaios (ventoinha B e ventoinha D) foi possível verificar que algumas características como o ângulo de ataque de 5° e as ranhuras se mostraram bastante eficientes, porém não se atuarem separadamente como estava sendo testado. Neste modelo, como podemos observar, o recurso do ângulo de 5° graus foi utilizado juntamente ao recurso de ranhurar parte da pá, desta forma, conseguimos atingir o equilíbrio demonstrado no estudo sobre o falcão. Conforme a figura 75, foi aplicado o ângulo de 5° graus observado no estudo e a textura das penas aqui reproduzida por sulcos, que se comparadas as asas do animal também retardam o descolamento da camada limite como na ave durante o voo.

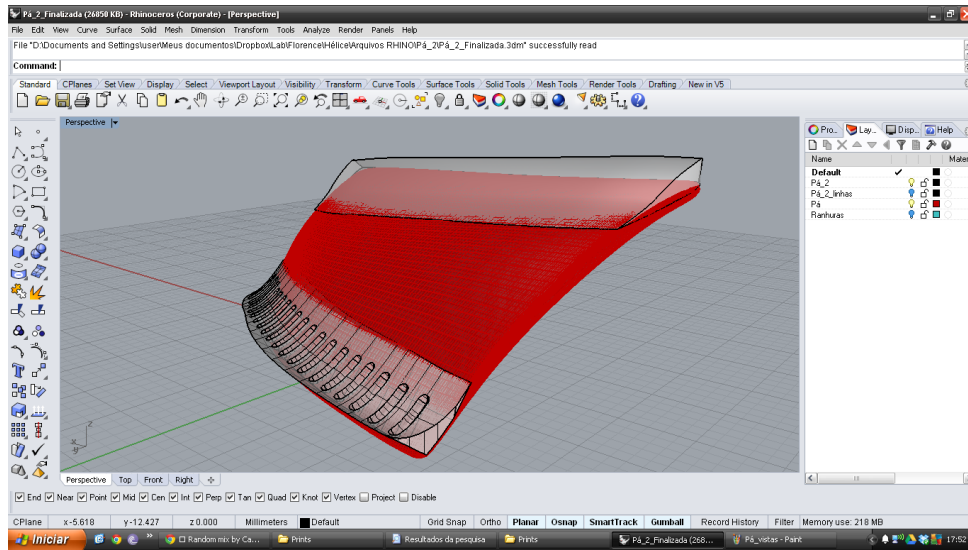
A textura E foi a mais eficiente identificada por meio dos ensaios. Atingiu a maior velocidade e foi a 2º mais sensível ao escoamento de ar.

Figura 75 - Modelagem da pá da ventoinha E.



Conforme a figura 76, observa-se as ranhuras sendo aplicadas na pá, repetindo o ângulo de 5° da ventoinha D, evidenciado também no ângulo de ataque da ave. Essa foi a forma que encontramos de utilizar as características que foram evidenciadas como as mais eficientes, sem perder de vista o estudo que auxiliou esta textura.

Figura 76 - Modelagem do ângulo da pá da ventoinha E.



Na figura 77, podemos observar o protótipo desta textura.

Figura 77 - Protótipo da ventoinha E.



A Textura E, através dos dados, tal como disponibiliza a tabela 12 apresenta 100rpm de velocidade a mais que a lisa e uma diferença de 1,3 Va mais de sensibilidade ao escoamento de ar.

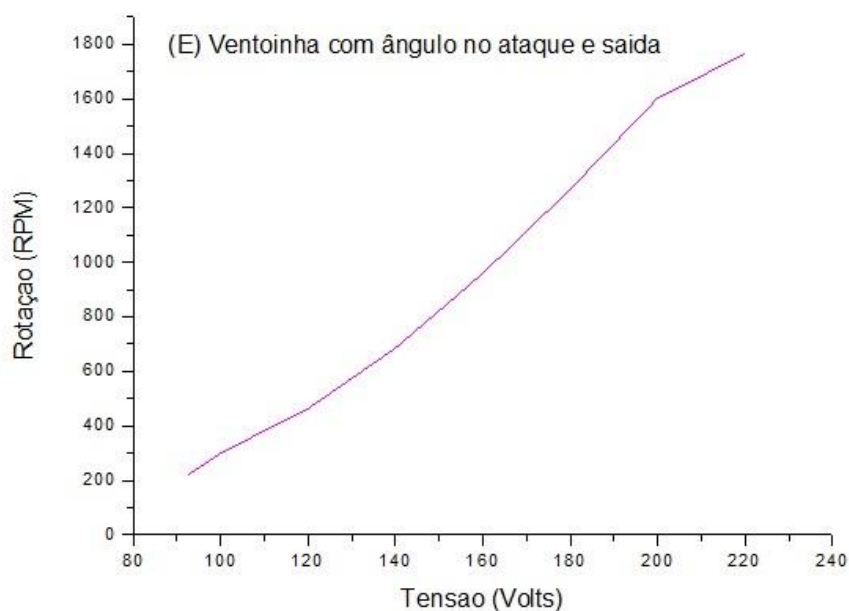


Tabela 12 - Resultados da ventoinha E.

(E) VENTONHA ÂNGULO NO ATAQUE E SAÍDA				
Tensão (V)	RPM	Vel. do escoamento de ar (m/s) 1° Teste	Temp. (oC) 1° Teste	REYNOLDS
60				
92,7	222,85	0,9	19,4	16644,970
100	300	1,1	19,5	20343,852
120	462,85	2	19,4	36988,823
140	685,71	2,7	19,4	49934,911
160	960	3,8	19,3	70278,763
180	1268,57	5,1	19,2	94321,499
200	1602,85	6,3	19,4	116514,792
220	1765,71	7	19,2	129460,881
Média de Temp.			19,35	

A curva de eficiência demonstra a alta velocidade que a textura E atingiu, superando a ventoinha padrão lisa.

Gráfico 14 - Gráfico indicativo da ventoinha E.



#### **4.5 Considerações finais do capítulo.**

Esse capítulo apresentou os resultados obtidos pela pesquisa através da aplicação do experimento. A análise dos dados permitiu identificar, entre as texturas, aquelas que se destacaram por seus atributos e que configuram as proposições eficientes. Pode-se afirmar que através dos ensaios foram comprovadas as proposições de eficiência de algumas texturas. Observou-se que a criação das superfícies finais, decorreu de forma exploratória em que uma textura serviu de base para a construção da próxima. De acordo com os resultados que obtivemos, foi visível que criou-se ventoinhas com diferentes características, inclusive apresentando otimizações diferentes em relação ao escoamento. Como resultado desta pesquisa a textura que originou o rotor mais eficiente foi a textura identificada como E. Desta forma, o próximo capítulo destina-se a uma síntese acerca dos resultados obtidos.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo são sintetizados resultados obtidos através das análises, apresentando conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

### **5.1 SÍNTESE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS E CONCLUSÕES**

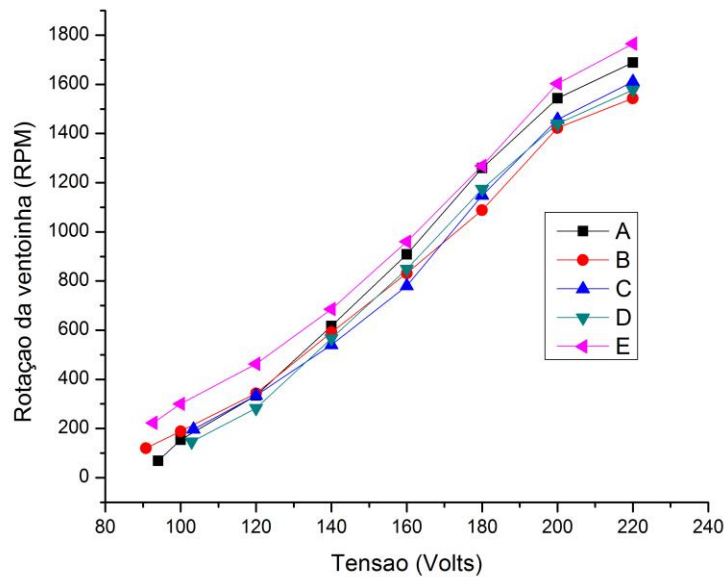
O gráfico 15 apresenta os resultados e ilustra que foram geradas ventoinhas com capacidades bastante diferentes, o que amplia de forma positiva a abordagem desta pesquisa. Este gráfico pode ser melhor visualizado no apêndice 3.

A ventoinha E, dentre os objetivos desta pesquisa, foi a textura que obteve melhor resultado, apresentando superação de eficiência em relação a ventoinha lisa. Dada a forma como a pesquisa se desenvolveu e observando a ampla gama de texturas possíveis em relação a demanda de possibilidades para o mercado, no gráfico 15 observamos ventoinhas que despontaram em relação a velocidade, em outro caso, destacaram-se em relação a sensibilidade ao escoamento de ar. Entendeu-se a partir da análise dos dados que estes são tipos diferentes de eficiências.

A Enercon, fábrica de rotores eólicos holandesa, por exemplo, apresenta em seu catálogo uma série de ventoinhas com características diferentes, cada uma delas é destinada a um desempenho diferenciado em relação ao uso, clima e temperatura que será exposta. Neste caso pôde-se refletir sobre a gama de ventoinhas que foram criadas através destas texturas.

Além dos resultados do trabalho, a parte experimental desta pesquisa nos proporcionou uma interação com os equipamentos e um aprofundamento nesta área de conhecimento. Algumas considerações no aspecto dos ensaios de cada ventoinha poderiam ainda ser ajustadas. Para as simulações aproximarem-se casa vez mais da realidade, a utilização de mais equipamentos, de forma que se possa medir maior número de dados, poderia aperfeiçoar a pesquisa para uma etapa mais aprofundada.

Gráfico 15 - Gráficos geral do resultado.



O Túnel aerodinâmico foi a ferramenta principal no trabalho, pois através dele foi possível separar as superfícies mais eficientes, além de possibilitar uma investigação de texturas e outras possibilidades. Este trabalho proporcionou a integração entre os laboratórios que são parceiros deste projeto, Laboratório de Instrumentação vinculado a engenharia mecânica UFRGS, Laboratório de Estudos Térmicos, Aerodinâmicos vinculados a engenharia mecânica UFRGS, Laboratório de Design e Seleção de Materiais vinculado ao PgDesign e Oficina de Modelos, Protótipos e Maquetes da Faculdade de Arquitetura.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, ficaria adequado um maior aprofundamento, com adição de outros instrumentos de medição, possibilitando a coleta de maior número de dados, por consequência mais conclusões poderia ser discutidas.

Foram investigadas uma série de texturas, porém devido ao enfoque do trabalho não foi possível, contudo, estudar com aprofundamento o impacto estético que as superfícies teriam com a implementação desta inovação.

## REFERÊNCIAS

ACKERMAN, Diane. Uma História Natural dos Sentidos, Editora Bertrand Brasil, 2º ed. São Paulo, 1996.

ALAM, F. CHOWDHURY, H. STEMMET, M. WANG, Z. YANG, J. Effect of surface structure on soccer ball aerodynamics. 9º Conference of the international sports engineering Association (ISEA). Australia March 2012

ARAÚJO, A. M. Mecânica dos Fluidos 2. Disponível em: <http://www.ufpe.br/ldpflu/capitulo2.pdf>. Acesso: 14/10/2013.

ARAÚJO, Mário; CASTRO, E. M. M.. Manual de Engenharia Têxtil – volume II. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1984.

BENNICH, P. Traceability and Measurement Uncertainty in Testing. MetroTrade Workshop, Berlin, 2003.

BESSANT, J. TIDD, J. Inovação e empreendedorismo. Porto Alegre: Bookman, 2009.

BIO, Sérgio Rodrigues. Sistemas de Informação: um enfoque gerencial. São Paulo: Atlas, 1996. p. 20-23.

BRASIL, M. D. M. E. E. Matriz Energética Nacional 2030. Brasília: Gráfica da Eletrobrás, 2007.

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. Wind energy: handbook. England: Ed. John Wiley & sons, 2001.

CENTRO DE TECNOLOGIA RENATO ARCHER . Disponível em: <http://www.cti.gov.br> Acessado em Maio de 2014.

CORY W. Fans and Ventilation: A practical guide By William Cory Publisher: Elsevier Science 2005.

COHEN, David (Ed.). Revista Época. Editora Globo, Edição Especial: Olimpíadas, nº 7, 2001.

DALMAZ, A. Estudo do potencial eólico e previsão de ventos para geração de eletricidade em Santa Catarina. Florianópolis/SC, 175 p., 2007. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

DAVENPORT, A. G; ISYMOV, N. The application of boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading. In: Proceedings of the international research seminar.: Wind effects on buildings and structures. Ottawa, Canada. September 11-15. Vol. 1 pp 201-230. 1967.

DISCHINGER, M.C.T.; COLLET, I.B.; KINDLEIN Jr, W. Desenvolvimento de Texturas como Contribuição ao Design Emocional. 7º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, Curitiba, 2006.

EVER COOL 120MM ALUMINUM Low Noise Frame Case Fan, Online Computer Store. Disponível em: [www.directron.com](http://www.directron.com). Acessado em Outubro de 2013

EVANS, C. J.; BRYAN, J. B. "Structured", "Textured" or "Engineered" Surfaces. Annals of the CCIRP, Vol. 48/2, 1999.

FERREIRA, J. Integration of reverse engineering and rapid tooling in foundry technology. Journal of Materials Processing Technology, 2003.

FOX, R. W., McDonald, A. T., Introduction to Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, 2006

FRANÇA, F. A. Determinação do arrasto total em perfil aerodinâmico. Unicamp, 2002.

FREITAS, Gustavo. Digitalização 3D em ambientes computacionais de suporte à Engenharia Simultânea aplicada ao setor de calçados. Dissertação de mestrado em desenvolvimento. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

GWEC – Global Wind Energy Council. Global Wind 2009 Report. Belgica: Ed. Angelika P., Liming Q. e Steve S., 2010.

HANSEN, M. O. L. Aerodynamics of Wind Turbines. United Kingdom: Ed. Earthscan, 2000

HENN, É. L. Máquinas de Fluido. Ed. UFSM, Santa Maria, Brasil, 2001.

INCOTERM - Soluções em medição Disponível em: <[www.incoterm.com.br](http://www.incoterm.com.br)> Acessado em Outubro de 2013

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. Fundamentos de transferência de calor e massa. Ed. LTC, 4ª edição, 1998.

INTERNATIONAL COUNCIL DESIGN OF SOCIETIES OF INDUSTRIAL DESIGN - ICSID. Disponível em: <<http://www.icsid.org>> acessado em junho de 2014.

JERVELL J. T. Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores. 2008

KALPAKJIAN, S. Manufacturing Process for Engineering Materials. Adisson-Wesley Publishing Company, 1985.

KINDLEIN, Wilson Jr. et al. Portal LdSM - Laboratório de Design e Seleção de Materiais. Disponível em <<http://www.ufrgs.br/ndsm>> acessado em junho de 2014.

KNOBEL, Marcelo. Rumo ao ouro, com ciência e tecnologia. Jornal da Unicamp, Edição 263, 2004.

KRIPPENDORFF, K. Product Semantics: a brief sketch. In P&D Design 2000, separata das conferências dos visitantes estrangeiros. Novo Hamburgo: AEND, 2000.

KUNZLER, Lizandra Stechman Quintana. Estudo das variáveis de rugosidade, dureza e condutividade térmica aplicado à percepção tátil. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

LINDEN, J. C. S.; KUNZLER, L. S. Q. A seleção de materiais e o conforto percebido em produtos. Gramado: ABERGO, 2001.

LÖBACH, B. Diseño Industrial: bases para la configuración de los productos industriales. Barcelona: Gustavo Gili, 1981.

LIBBY, P. A., An introduction to turbulence, Washington: Taylor & Francis, 1996

MANZINI, E. La material dell'invenzione. Arcadia Edizione, 2ª ed., 1989.

MEGGINSON, Leon C. et al. Administração: conceitos e aplicações. 4.ed. São Paulo: Harbra, 1998, p.11-12.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. Revista Brasileira de Ensino de Física. V.30, Artigo nº 1304, 2008.

MINIPA. Disponível em <[www.minipa.com.br](http://www.minipa.com.br)> Acessado em Outubro de 2014

MOTTA, V. F. Curso de Teoria da Semelhança. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1972

MOLLER, s. v.: SILVESTRINI, J.H. Turbulência, v. 4. ABCM, Rio de Janeiro, Brasil, 2004

NORMAN, D. A. Emotion and design: Attractive things work better. Interactions



Magazine, ix (4), p. 36-42, 2002.

OPTIMET. Introduction. In: OPTIMET, Optical Metrology, 2003. Disponível em: <<http://optimet.com/technology.htm>> acessado em março de 2014.

ÇENGEL, Y., Fluid Mechanics: fundamentals and applications, the McGraw-Hill companies Inc., 2006

PEREIRA, Ivo Alexandre Brás Barroso Escoamento Turbulento em Torno de um Cilindro a Baixo Número de Reynolds 'Comparação entre Modelos de Turbulência' .Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2010

PETRY, A. P. Análise numérica de escoamentos turbulentos tridimensionais empregando o método de elementos finitos e simulação de grandes escalas. Porto Alegre/RS, 149 p., 2002. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PIRES, Julio C. Pinheiro. Estudo de Rotor para Turbina Eólica de Eixo Horizontal de Pequeno Porte com Aplicação de Modelagem e Simulação Virtual. Porto Alegre 2010.

<<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/29058>>. Acesso em: março/ 2014.

PONITZ B, Schmitz A, Fischer D, Bleckmann H, Brücker C (2014) Diving-Flight Aerodynamics of a Peregrine Falcon (*Falco peregrinus*). PLoS ONE 9(2): e86506. doi:10.1371/journal.pone.0086506. 2014

POPE, S. B., Turbulent flows, Cambridge University Press, United Kingdom, 2003.

PUCRS - Centro de Energia Eólica Disponível em: <[www.pucrs.br](http://www.pucrs.br)> Acessado em Novembro de 2013

José Carlos. Aeromodelismo – Teórico e Prático. Edição digital, 2004. Disponível: <<http://www.fpam.pt/Informacoes/LivroAeromodelismo/capitulo1.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2013

ROSENFELD, R; SERVO, j.c. Facilitating innovation in large organizations. In: HENRY, J; WALKER, D. Managing innovation. London: Sage, 1991.

RUBINI, C. E.; AGUIAR, G. A aerodinâmica da bola de futebol. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 4, 2004.

RÜTHSCHILLING, Evelise Anicet. Design de Superfície. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2008

RUIZ, Guillermo González. Estudio de Diseño – Sobre la construcción de las ideas y su aplicación a la realidad. Buenos Aires: Emecé Editores, 1994.

SANTAELLA, Lucia. Semiótica Aplicada. Editora Thomson. São Paulo. 2002.

SHAMES, I.H. Mecânica dos Fluidos. Edgard Blücher, v.1-2, 1995

SHARKOON. Sharkoon Silent Eagle. CDRInfo, 2005. Disponível em: <<http://www.cdrinfo.com/Sections/Reviews/Specific.aspx?ArticleId=15798&PageId=>> acessado em Outubro de 2013.

SILVA. F. P. O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos. 2006.

SILVA, Everton Amaral. Um sistema informacional e perceptivo de seleção de materiais com enfoque no design de calçados. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005

SILVEIRA NETO, A. Fundamentos da Turbulência nos Fluidos. Rio de Janeiro: ABCM, 2002.

SOKOVIC, M. RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development. Journal of Materials Processing Technology, 2005.

STACO VARIABLE TRANSFORMERS VOLTAGE DOUBLERS - 120V Input 0-280V Output. Disponível em <[www.variac.com](http://www.variac.com)> acessado em Outubro de 2013

STOKES, J. Theory and Application of the High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Thermal spray Process - Cap. II. Dublin City University, Dublin, Irlanda. 2008. 14p

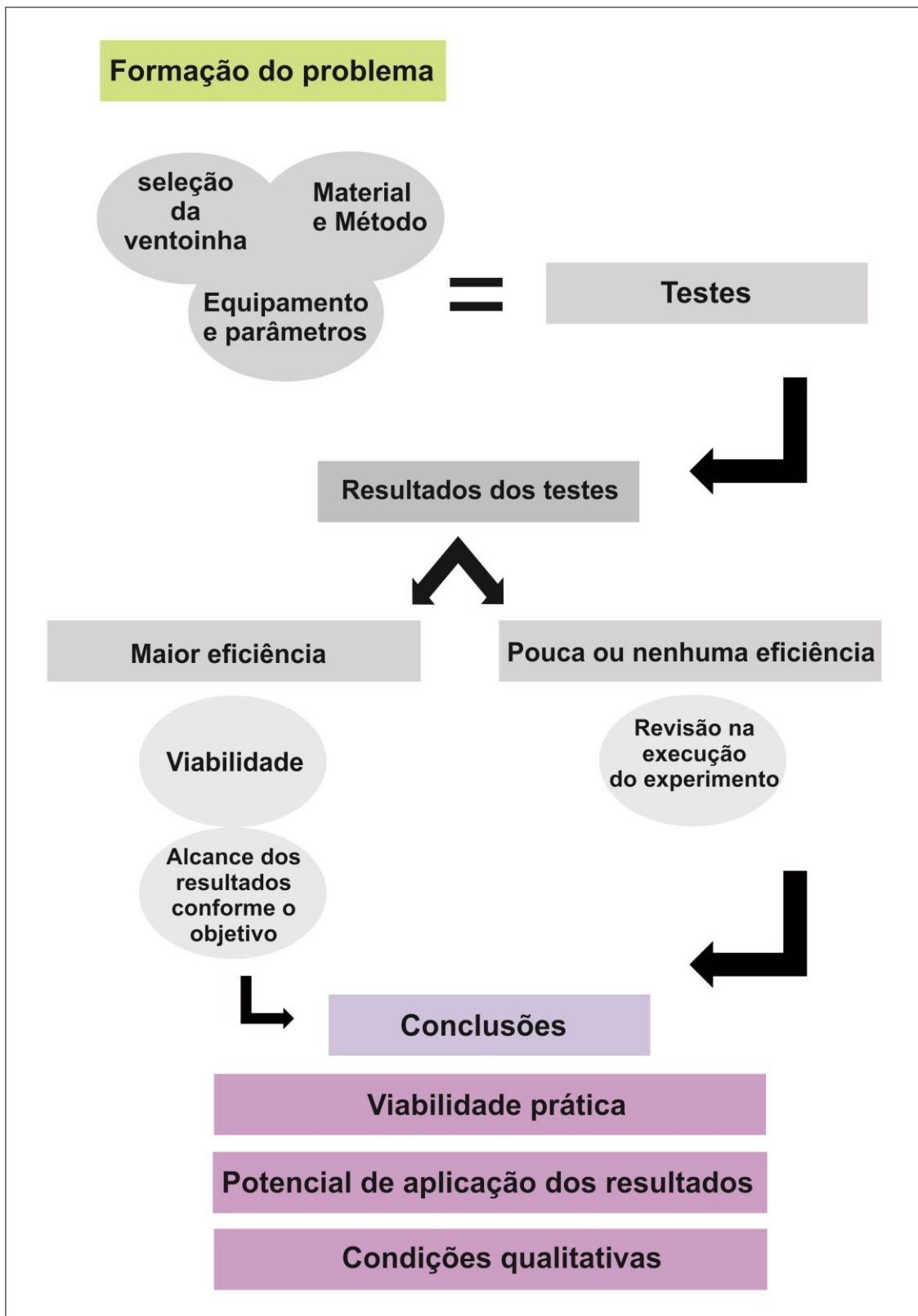
STOUT, K.J. Engineered Surfaces - a philosophy of manufacture. In press, Paris, 1999.

WENZEL, G. M. Análise numérica da esteira de turbinas eólicas de eixo horizontal: Estudo comparativo com modelos analíticos. Dissertação de Mestrado no programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica – UFRGS. Porto Alegre. 2010.

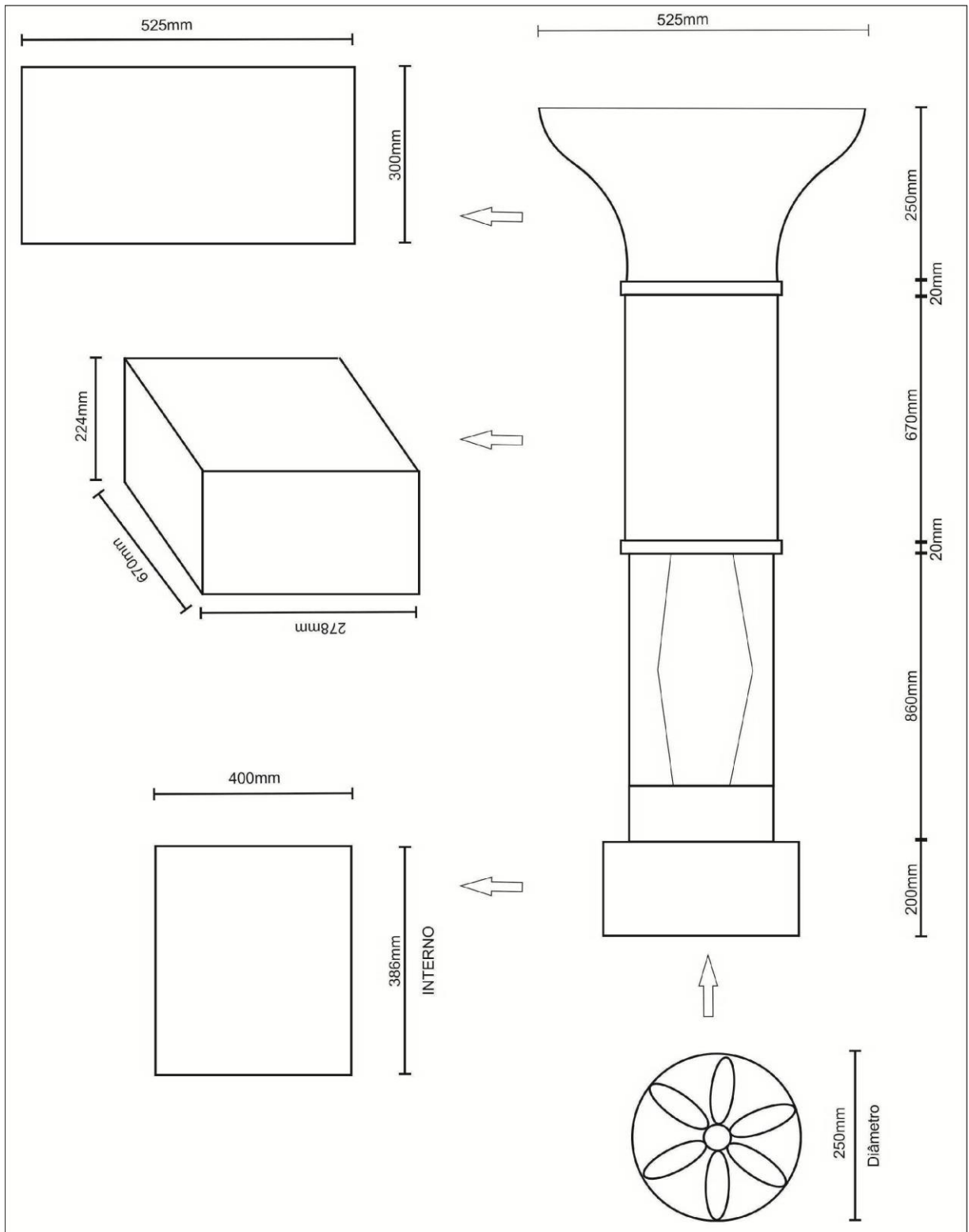
WONG, W. Princípios de Forma e Desenho. São Paulo, ed. Martins Fontes, 1998.

WHITE, F. M., Fluid Mechanics, 5th edition, McGraw-Hill: Boston, 2003

## APÊNDICE 1 - Desenvolvimento da Pesquisa



## APÊNDICE 2 - Dimensionamento do túnel aerodinâmico



### APÊNDICE 3 - Gráfico de resultados finais e comparativos

