

ESTUDO AERODINÂMICO DO EFEITO - DA RUGOSIDADE NO DESEMPENHO DE UM MODELO DE TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

JAQUELINE BARBOSA DO NASCIMENTO

DEDALUS - Acervo - EESC



31100035901



Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Martini Catalano

São Carlos
1998

Class.	TFSE-EESC
Cutt.	3880
Tombo	0193168

✓ 3110003590L

02/04/98

14 0984343

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

N244e Nascimento, Jaqueline Barbosa do
Estudo aerodinâmico do efeito da rugosidade no
desempenho de um modelo de turbina eólica de eixo
horizontal / Jaqueline Barbosa do Nascimento. --
São Carlos, 1998.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Martini
Catalano.

1. Aerodinâmica. 2. Turbinas eólicas.
3. Aerofólio. 4. Rugosidade. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **JAQUELINE BARBOSA DO NASCIMENTO**

Tese defendida e aprovada em 02.07.1998
pela Comissão Julgadora:



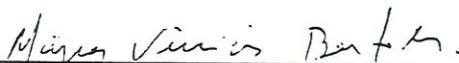
Prof. Dr. **FERNANDO MARTINI CATALANO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Titular **ROSALVO TIAGO RUFFINO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



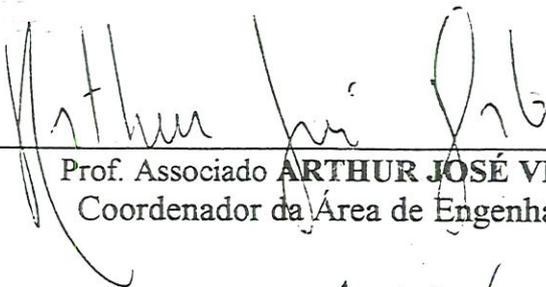
Prof. Dr. **MICHAEL GEORGE MAUNSELL**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



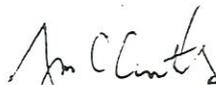
Prof. Dr. **MARCOS VINICIUS BORTOLUS**
(Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG)



Prof. Dr. **EVERALDO ALENCAR DO NASCIMENTO FEITOSA**
(Universidade Federal de Pernambuco - UFPE)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

“Um dia, o meu povo não terá fome nem medo; fazê-lo
assim é a minha vida”

A. KOLONAI

*Aos meus pais, Alúcio e Maria de Lourdes, e meus
irmãos, Wellington, Wallace, Wilson, Jonistaine e
Soraia.*

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial

Ao meu orientador, Fernando Martini Catalano, minha eterna gratidão pela paciência em me orientar e por me apresentar de maneira criativa ao mundo da pesquisa experimental.

Agradecimentos gerais

Primeiramente, agradeço a Deus.

A minha família, por ter acreditado em mim (espero nunca tê-la decepcionado).

Seguindo, não poderia deixar de agradecer aos meus colegas: Zé, João, Dawson e Juan Carlos, pela paciência que sempre tiveram em me agüentar; e a Rogério, pela força na execução dos experimentos, deixando, muitas vezes, o aconchego do seu lar (tudo pela ciência!).

Aos técnicos do Laboratório de Aeronaves, Osnan, Otávio e Carlos Eduardo; e a secretária, Helenita, pelo suporte dado em todo o trabalho.

A minha grande amiga, Vânia, que me fez ver que há vida além do limite acadêmico, deixando, muitas vezes, o seu trabalho para me dar uma força nos meus momentos mais difíceis ao longo do curso.

As secretárias Ana Paula e Beth por terem me dado tento e rumo no trato com as questões burocráticas, uma das minhas principais dificuldades.

Aos técnicos do LAMAFE, Bruninho, Sr. Adão, Botelho e Zé, por terem me cedido, gentilmente, os instrumentos utilizados nos meus experimentos.

Ao prof. Jaime Duduch e o Renatão pelas horas de almoço, tecendo planos e acreditando que a vida acadêmica, apesar de dura, é gratificante.

A Claudinha, Lilian e Tânia, pelo aconchego do lar. A Celsinho, Vaninha, Stelvia e Luciana, por compartilharmos juntos tantas situações de alegria e tristeza. A Luíza e Amélia pela amizade. A Leo pela grande “sacada”.

Aos dois nordestinos de fibra, Neilor e Geraldo, pelas horas entrando na madrugada, na execução dos experimentos... foram fortes e pacientes (“Nordestino é mesmo madeira de dar em doido, que a vida enverga, mas não consegue quebrar, não...”)

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, docentes e funcionários.

Aos pesquisadores em energia eólica, no Brasil, pelo incentivo.

À CAPES, pelo financiamento.

A todos os meus colegas do Campus da EESC.

A esta cidade que me despertou o ideal e a saudade do Nordeste.

A minha gente.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
Introdução.....	1
CAPÍTULO 1 -REVISÃO DA LITERATURA:	
Estudos sobre os fatores intervenientes na geração de energia eólica.....	3
1.1 - Breve Histórico.....	3
1.2 - Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal.....	4
1.2.1 - Aerodinâmica das pás.....	5
1.2.1.1. - Controles Aerodinâmicos.....	6
1.2.1.2 - Características de Aerofólios.....	7
1.2.1.3 - A rugosidade e o desempenho da turbina.....	14
1.2.1.4 - O Processo de Estol.....	20
1.2.1.5 - Desempenho Aerodinâmico.....	23
1.2.1.6 - Ensaio Bi e Tridimensionais.....	24
1.2.2 - Projeto de Turbinas.....	25
CAPÍTULO 2 - TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL.....	28
2.1 - Produção de um modelo.....	29
2.2 - Componentes do Sistema.....	31
2.2.1 – Rotor.....	31
2.2.2 - Gerador.....	31
2.2.3 - Torre.....	32
2.3 - Desempenho de Turbinas Eólicas - parâmetros.....	32
2.3.1 - Coeficiente de Potência.....	34
2.3.2 - Coeficiente de Torque.....	35
2.3.3 - Relação de velocidade na ponta (λ).....	35
2.3.4 - Velocidade de rotação.....	36
2.3.5 - Eficiência e Rendimento.....	39
2.4 - A extração de energia.....	40
2.5 – Aerodinâmica aplicada à turbinas eólicas.....	44
2.5.1 - Aerodinâmica básica.....	44
2.5.2 – Teorias aplicadas.....	49
2.5.3 – A superfície rugosa.....	52
2.5.4 – Métodos de Visualização de Fluxo.....	57
CAPÍTULO 3 -..PROJETO DO MODELO DA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL.....	61
3.1 – Características do modelo.....	61

3.1.1.1.1 - <u>Perfis adotados</u>	65
3.1.2 – Montagem do modelo	69
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA	71
4.1 – Etapas dos ensaios	71
4.2.1 – Ensaio com a pá parada	72
4.2.2 – Ensaio com as Pás do Rotor Girando	75
4.2.2.1.1 - <u>Ensaio com pá lisa, sem rugosidade</u>	78
4.2.2.1.2 – <u>Ensaio com a pá rugosa</u>	79
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
5.1 – Ensaio da pá parada dentro do túnel	81
5.1.1 – Ensaio com a pá lisa e com a pá rugosa	81
5.1.1.1 - Curvas de Sustentação ($C_L \times \alpha$)	81
5.1.1.2 – Curvas de Arrasto ($C_D \times \alpha$).....	87
5.1.2 – Ensaio de Visualização	93
5.2 – Ensaio com as pás do rotor girando	102
5.2.1 – Ensaio com a pá lisa e rugosa	102
5.2.1.1 – Variação de geração de potência em função da rugosidade e do ângulo de passo	103
5.2.1.2 – Variação de geração de torque em função da rugosidade e do ângulo de passo	112
5.2.2 - Ensaio de transição da camada limite sobre as pás do rotor girando	121
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	128
6.1 – Conclusões	128
6.2 – Sugestões.....	130
BIBLIOGRAFIA.....	1
ANEXO A	1
Balança Aerodinâmica	1
ANEXO B.....	3
ANEXO C.....	4

LISTA DE FIGURAS

	pag.
FIGURA 1.1 Imagem de uma Turbina Eólica de três pás.	05
FIGURA 1.2 Imagem de um campo eólico europeu com turbinas do tipo eixo horizontal com 3 pás.	06
FIGURA 1.3 Efeito do número finito de pás sobre o coeficiente de potência e empuxo (torque).	12
FIGURA 1.4 Variação do coeficiente de potência com o coeficiente de arrasto.	13
FIGURA 1.5 Curvas de Potência (experimentais) com pás lisas (ou limpas).	13
FIGURA 1.6 Curvas de Potência (experimentais) com pás rugosas (ou sujas).	14
FIGURA 1.7 Efeito da rugosidade sobre o desempenho de um rotor eólico de pequena escala.	16
FIGURA 1.8 Ilustração do escoamento sobre o disco atuador.	23
FIGURA 2.1 Desempenho típico de turbinas eólicas	33
FIGURA 2.2 Ilustração de um tubo de corrente.	36
FIGURA 2.3 Esforços atuantes na pá.	37
FIGURA 2.4 Forças aerodinâmicas sobre um aerofólio.	45
FIGURA 2.5 Escoamento em torno da pá de uma turbina eólica.	47
FIGURA 2.6 Curvas $C_{L\alpha}$ e $C_{D\alpha}$ típicas para dois aerofólios convencionais.	48

FIGURA 2.7	Representação de um tubo de corrente do fluxo numa turbina eólica de eixo horizontal.	50
FIGURA 2.8	Volume de controle e notação simplificados, utilizados para analisar o desempenho de uma turbina eólica de eixo horizontal.	58
FIGURA 2.9	Arrasto sobre cilindros circulares com rugosidade variada.	56
FIGURA 3.1	Desenho do modelo.	64
FIGURA 3.2	Desenho tridimensional da pá do modelo.	65
FIGURA 3.3	Fotografia do modelo da turbina montada.	66
FIGURA 3.4	Fotografia dos moldes utilizados para fabricação das pás.	68
FIGURA 3.5	Imagem fotográfica das pás.	68
FIGURA 3.6	Fotografia do conjunto cinemático.	70
FIGURA 4.1	Fotografia do modelo montado na saída do túnel de vento.	76
FIGURA 4.2	Desenho esquemático do conjunto cinemático.	77
FIGURA 5.1	Curva de sustentação para o caso liso.	82
FIGURA 5.2	Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada à 4% da corda.	83
FIGURA 5.3	Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada à 8% da corda.	83
FIGURA 5.4	Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada a 12% da corda.	83
FIGURA 5.5	Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada à 16% da corda.	83
FIGURA 5.6	Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada à 20% da corda.	84
FIGURA 5.7	Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada à 24% da corda.	84
FIGURA 5.8	Curva de sustentação para a rugosidade de 0.210mm colocada à 24% da corda.	85

FIGURA 5.9	Curva de sustentação para a rugosidade de 0.24mm colocada à 24% da corda.	85
FIGURA 5.10	Curva de sustentação considerando um ângulo de ataque máximo de 29° para três tipos de tamanhos de grãos depositados na faixa de 24% da corda.	86
FIGURA 5.11	Curva de arrasto para a pá lisa.	87
FIGURA 5.12	Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 4% da corda.	88
FIGURA 5.13	Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 8% da corda.	89
FIGURA 5.14	Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 12% da corda.	89
FIGURA 5.15	Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 16% da corda.	89
FIGURA 5.16	Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 20% da corda.	90
FIGURA 5.17	Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 24% da corda.	90
FIGURA 5.18	Curva de arrasto para a rugosidade de 0.210mm colocada à 24% da corda.	91
FIGURA 5.19	Curva de arrasto para a rugosidade de 0.25mm colocada à 24% da corda.	92
FIGURA 5.20	Curva de arrasto agrupadas de acordo com a granulometria.	92
FIGURA 5.21	Transição da camada limite com ângulo de ataque de 0 grau.	94
FIGURA 5.22	Transição da camada limite com ângulo de ataque de 4 graus.	94
FIGURA 5.23	Transição da camada limite com ângulo de ataque de 8 graus.	95
FIGURA 5.24	Transição da camada limite com ângulo de ataque de 12	96

graus.

- FIGURA 5.25 Transição da camada limite com ângulo de ataque de 16 graus. 96
- FIGURA 5.26 Curvas de transição comparativas para os ângulos de ataque de 0, 4, 8, 12 e 16 graus. 96
- FIGURA 5.27 Curvas de transição comparativas para os ângulos de ataque de 2, 6, 10 e 14 graus. 97
- FIGURA 5.28 Transição da camada limite com ângulo de ataque de 0 grau. 98
- FIGURA 5.29 Transição da camada limite com ângulo de ataque de 4 graus. 98
- FIGURA 5.30 Transição da camada limite com ângulo de ataque de 8 graus. 98
- FIGURA 5.31 Transição da camada limite com ângulo de ataque de 12 graus. 100
- FIGURA 5.32 Curvas de transição comparativas para os ângulos de ataque de 0, 4, 8 e 12 graus. 100
- FIGURA 5.33 Curvas de transição comparativas para os ângulos de ataque de 2, 6, 10 e 14 graus. 101
- FIGURA 5.34 Variação de geração de potência considerando a rugosidade de 0.25mm colocada em várias posições da corda. 103
- FIGURA 5.35 Variação de geração de potência considerando a rugosidade de 0.149mm colocada em várias posições da corda. 104
- FIGURA 5.36 Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 4% da corda. 104
- FIGURA 5.37 Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 8% da corda. 105
- FIGURA 5.38 Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 105

12% da corda.

- FIGURA 5.39 Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 16% da corda. 106
- FIGURA 5.40 Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 20% da corda. 106
- FIGURA 5.41 Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 24% da corda. 107
- FIGURA 5.42 Influência da rugosidade de 0.149mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de potência. 108
- FIGURA 5.43 Influência da rugosidade de 0.25mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de potência. 108
- FIGURA 5.44 Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 0 grau. 109
- FIGURA 5.45 Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 5 graus. 110
- FIGURA 5.46 Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 10 graus. 110
- FIGURA 5.47 Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 15 graus. 111
- FIGURA 5.48 Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 20 graus. 111
- FIGURA 5.49 Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 25 graus. 111
- FIGURA 5.50 Variação de geração de torque considerando a rugosidade de 0.149mm colocada em várias posições da corda. 112
- FIGURA 5.51 Variação de geração de torque considerando a rugosidade de 0.25mm colocada em várias posições da corda. 113

- FIGURA 5.52 Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 4% da corda. 113
- FIGURA 5.53 Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 8% da corda. 114
- FIGURA 5.54 Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 12% da corda. 115
- FIGURA 5.55 Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 16% da corda. 115
- FIGURA 5.56 Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 20% da corda. 116
- FIGURA 5.57 Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 24% da corda. 116
- FIGURA 5.58 Influência da rugosidade de 0.149mm colocada 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque. 117
- FIGURA 5.59 Influência da rugosidade de 0.25mm colocada 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque. 117
- FIGURA 5.60 Influência da rugosidade de 0.25mm colocada 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 0 grau. 118
- FIGURA 5.61 Influência da rugosidade de 0.25mm colocada 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 5 graus. 118
- FIGURA 5.62 Influência da rugosidade de 0.25mm colocada 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 10 graus. 119
- FIGURA 5.63 Influência da rugosidade de 0.25mm colocada 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 15 graus. 119
- FIGURA 5.64 Influência da rugosidade de 0.25mm colocada 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 20 graus. 120

- FIGURA 5.65 Influência da rugosidade de 0.25mm colocada 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 25 graus. 122
- FIGURA 5.66 Local da transição da camada limite em relação a corda a 10% do raio da pá. 122
- FIGURA 5.67 Local da transição da camada limite em relação a corda a 20% do raio da pá. 122
- FIGURA 5.68 Local da transição da camada limite em relação a corda a 30% do raio da pá. 123
- FIGURA 5.69 Local da transição da camada limite em relação a corda a 40% do raio da pá. 123
- FIGURA 5.70 Local da transição da camada limite em relação a corda a 50% do raio da pá. 124
- FIGURA 5.71 Local da transição da camada limite em relação a corda a 60% do raio da pá. 124
- FIGURA 5.72 Local da transição da camada limite em relação a corda a 70% do raio da pá. 125
- FIGURA 5.73 Local da transição da camada limite em relação a corda a 80% do raio da pá. 125
- FIGURA 5.74 Local da transição da camada limite em relação a corda a 90% do raio da pá. 125
- FIGURA 5.75 Local da transição da camada limite em relação a corda a 100% do raio da pá. 126
- FIGURA 5.76 Imagem de uma pequena partícula de arrasto provocando a transição prematura da camada limite. 127
- FIGURA 5.77 Imagem de um ponto de descolamento sem ocorrência da transição. 127

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Valores típicos da razão arrasto e sustentação, C_d/C_l e d_α e C_l para alguns aerofólios. A curvatura dos perfis de placa curvada é definida como a razão entre a sua espessura projetada e sua corda	49
TABELA 3.1	Distribuição dos aerofólio na pá.	64
TABELA 4.1	Características da peneira Solotest – grãos de areia.	73
TABELA 4.2	Valores da corda para as estações da ponta da pá.	74
TABELA 4.3	Tamanho de grãos e faixa de aplicação adotados no ensaio de rugosidades de pá parada.	74
TABELA 4.4	Tamanhos de grãos adotados no ensaio de rugosidade com o rotor girando.	79

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Altura (m)
K_{adm}	altura admissível do elemento de rugosidade (m)
k	diâmetro de uma dada partícula (m)
K	altura de protusão (m)
α	Ângulo de ataque (grau)
β	Ângulo de passo (grau)
S	Área projetada da pá (corda x comprimento) (m ²)
A	Área transversal varrida pela turbina (m ²)
C_d	Coefficiente de arrasto numa dada seção (adimensional)
C_D	Coefficiente de arrasto total (adimensional)
C_P	Coefficiente de potência (adimensional)
C_{pliso}	Coefficiente de potência considerando a pá lisa (adimensional)
C_l	Coefficiente de sustentação numa dada seção (adimensional)
C_L	Coefficiente de sustentação total (adimensional)
C_T	Coefficiente de torque (adimensional)
C_q	Coefficiente de torque de partida (adimensional)
C	Corda (m)
ρ	Densidade do ar (kg/m ³)

η	Eficiência (adimensional)
F	Empuxo numa turbina de eixo horizontal (N)
E_c	Energia cinética do vento ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
a	Fator de interferência axial
a'	Fator de interferência radial
D	Força de arrasto (N)
L	Força de sustentação (N)
Rey	Número de Reynolds (adimensional)
R_l	Número de Reynolds considerando o comprimento l (adimensional)
Re_c	Número de Reynolds na corda considerada (adimensional)
x/c	percentagem da corda
r/R	percentagem do Raio
P_V	Potência eólica num tubo de corrente de área transversal igual a área varrida pela turbina (W)
P_t	Potência no eixo da turbina (W)
r	Raio de uma dada seção da pá (m)
R	Raio do rotor (m)
λ_0	Relação de velocidade de projeto (adimensional)
λ	Relação de velocidades (adimensional)
T	Torque (N)
d_{CP}/C_{Pliso}	Variação de potência entre o caso rugoso e o liso
V_1	Velocidade à jusante (m/s)
V_2	Velocidade à montante (m/s)

ω	Velocidade de rotação (rpm)
V_R	Velocidade de vento relativa (m/s)
V	Velocidade do fluxo (m/s)
U_{∞}	Velocidade do fluxo livre (m/s)
V_{10}	Velocidade do vento a 10m de altura (m/s)
V	Velocidade do vento na altura h (m/s)
ν	Viscosidade cinemática (m ² /s)

RESUMO

Nascimento, J.B. Estudo Aerodinâmico de Novos Perfis num Modelo de Turbina Eólica de Eixo Horizontal. São Carlos, 1998. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

O interesse pela pesquisa em energia eólica tem aumentado consideravelmente com o advento da crise energética, o que tem motivado o desenvolvimento das turbinas eólicas. Dentre estas, as turbinas eólicas de eixo horizontal têm se destacado devido ao seu uso extensivo, intensificando a importância do estudo aerodinâmico. Assim, neste estudo, foi projetado e construído um modelo de turbina eólica de eixo horizontal de três pás fabricado em fibra de vidro, com 1,8 m de diâmetro do rotor, e adotados os perfis FFA-W1-xxx, projetados especificamente para uso em turbinas eólicas. A turbina é controlada por passo, com ajuste manual e as pás são retas, sem torção. Foram realizados ensaios aerodinâmicos visando a fornecer informações sobre o desempenho do sistema que, de modo geral, é bastante afetado pela rugosidade (sujeira e incrustação de insetos das pás, devido às condições atmosféricas), foram, também, realizados ensaios de visualização do escoamento sobre as pás que permitiram fornecer informações sobre a transição da camada limite. Os resultados obtidos forneceram dados quantitativos da perda de desempenho aerodinâmico devido à rugosidade, além de apresentar características aerodinâmicas do perfil adotado.

Palavras-chave: aerodinâmica, turbinas eólicas, aerofólio, rugosidade

ABSTRACT

Nascimento, J.B. Estudo Aerodinâmico de Novos Perfis num Modelo de Turbina Eólica de Eixo Horizontal. São Carlos, 1998. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

Interest in wind power research has been increased with the world energy crisis and has resulted in the development of wind turbines. Among them, the horizontal axis wind turbine stands out due its extensive use. Within this area, aerodynamic research logically has an important role. Thus, a model of a horizontal axis wind turbine with three blades and 1.8m diameter of rotor was designed and built. The airfoils used to make the blades in fiber glass were FFA-W1-xxx, especifically projected to be used in wind turbines. The blades have no torsion. The turbine model is controlled in pitch. Aerodynamic tests were performed with the rotor driven by a controlled airflow in order to gather aerodynamic data on system performance. Performance is affected by roughness (dirt and insect infestation), that occurs on the blades due to normal atmospheric conditions. Flow visualization tests were also performed on the blades that permitted information to be obtained about the boundary layer. The results obtained give quantitative data on aerodynamic performance losses caused by a roughness strip, besides presenting effective data about the use of the airfoils adopted.

Key-words: aerodinamic, wind turbines, airfoil, roughness

INTRODUÇÃO

As fontes alternativas de energia têm despertado grande interesse no meio científico, devido à crise energética, pela qual passa a humanidade. Dentre as várias fontes de energia existentes, a eólica vem apontando como uma das mais importantes, tendo a seu favor o fato de produzir energia limpa, inesgotável e, com apoio dos governos, de baixo custo.

Entre as várias máquinas usadas para extrair energia do vento, tem-se dado especial atenção as turbinas eólicas de eixo horizontal rápida (de duas ou três pás), as quais têm sido aperfeiçoadas científica e tecnologicamente nos grandes centros de pesquisa.

Um sistema eólico dessa natureza envolve uma pesquisa multidisciplinar que vise ao aumento de captação de energia, de forma eficiente e barata. Nesse âmbito multidisciplinar, o estudo aerodinâmico vem se desenvolvendo nos últimos anos, despertando, inclusive, o interesse da aeronáutica, que tem se empenhado em desenvolver novos estudos, utilizando a teoria básica existente.

Para isso, é necessário aproveitar a capacidade máxima da turbina, tentando eliminar ou minimizar possíveis problemas que comprometam o seu desempenho. Entre os problemas detectados, destaca-se a

incrustação de insetos, que ocorre naturalmente, e a presença de sujeira, uma vez que as pás das turbinas não são limpas com frequência (rugosidade).

Sendo assim, este estudo tem como objetivo investigar, através de ensaios aerodinâmicos, o efeito da rugosidade sobre a transição da camada limite, com conseqüente perda de potência e torque, analisados adimensionalmente; e a visualização do escoamento sobre a pá.

Para tanto, realizou-se uma revisão exaustiva na literatura sobre o tema (Capítulo 1), procurando historiar os tipos de aproveitamento de energia eólica e explicitar os estudos realizados, visando a um melhor desempenho das turbinas eólicas na captação de energia.

No Capítulo 2, encontram-se as informações referentes a teoria de eficiência de turbinas eólicas mostrando a ocorrência de variabilidade dessa eficiência de acordo com o tipo de turbina, o que interfere nos parâmetros do projeto. Desse modo, são colocadas as condições de produção do modelo, tendo em vista as variáveis intervenientes no processo.

A metodologia do estudo considera as características detalhadas do equipamento utilizado (modelo de uma turbina eólica de eixo horizontal) e a descrição das etapas desenvolvidas no ensaio, contidas nos Capítulos 3 e 4.

No Capítulo 5 estão expostos os resultados e a análise dos dados do estudo, respeitando as duas etapas dos ensaios.

Finalizando, as conclusões e sugestões do estudo estão presentes no capítulo 6.

Espera-se que essa forma dada ao estudo auxilie no entendimento das questões aqui tratadas, podendo se estabelecer as relações necessárias à consecução do objeto proposto.

CAPÍTULO 1 - REVISÃO DA LITERATURA: Estudos sobre os fatores intervenientes na geração de energia eólica

1.1 - Breve Histórico

Há muitos séculos, o homem utiliza o vento como fonte de energia. Desde aproximadamente 2.000 a.C., os cata-ventos foram usados, para moagem de grãos e para produção de energia na Babilônia, na China e na Pérsia. Na Europa, os cata-ventos apareceram por volta do século XII e se constituíram numa das poucas fontes de energia mecânica rotacional, até meados do século XVIII. Com o desenvolvimento da máquina a vapor, o número de cata-ventos diminuiu rapidamente, durante os dois últimos séculos. A tecnologia eólica, desde então, apresentou vagaroso desenvolvimento, restringindo-se ao cata-vento multipás americano, surgido no final do século XIX. Muitas máquinas desse tipo ainda são usadas em todo o mundo, para bombeamento de água (SILVA, 1991).

Seguindo os avanços da tecnologia da aviação, obtidos durante a segunda Grande Guerra, a turbina eólica de eixo horizontal, utilizada para

geração de eletricidade, foi introduzida e usada extensivamente em áreas rurais. Desde então, essa turbina vem alcançando elevado estágio de desenvolvimento científico e tecnológico. Seguindo, os avanços conduziram a novos tipos de máquinas, destacando-se as turbinas de eixo vertical Darrieus e Savonius, entre outras.

No Brasil, as instalações eólicas concentram-se principalmente no Nordeste, onde, os ventos constantes fazem da região uma das áreas mais propícias para sua instalação.

1.2 - Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal

O mecanismo pelo qual o vento aciona uma turbina eólica é, de um modo geral, simples. A pá divide o vento efetivo, aproximando-se do bordo de fuga da mesma forma que faz a asa de um avião, defletindo a corrente em reação ao empuxo ou sustentação conferida. Uma turbina eólica de eixo horizontal moderna possui um rotor, com duas ou três pás leves (FIGURAS 1.1 e 1.2). As pás são separadas umas das outras apenas o bastante para que o fluxo não seja perturbado pela pá precedente. Embora elas tenham baixa solidez, cobrindo apenas uma pequena fração do círculo da pá num instante, estas, efetivamente, retardam a passagem do ar durante cada ciclo da sua rotação, extraindo potência do processo (INGLIS, 1979).

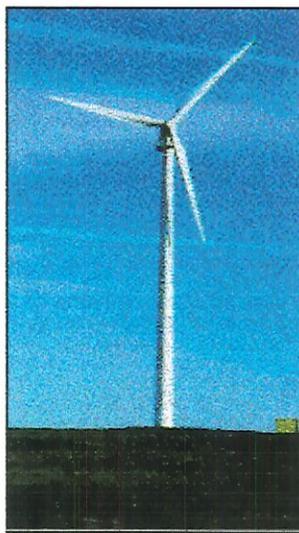


FIGURA 1.1 - Imagem de uma Turbina eólica de três pás.

1.2.1 - Aerodinâmica das pás

O estudo aerodinâmico das pás de um rotor eólico concentra-se basicamente no comportamento da camada limite sobre elas, ou seja, no comportamento do fluxo que escoar em região limitada ao redor das pás. Isto, de um modo geral, envolve esforços para que o desempenho aerodinâmico seja o maior possível, obtendo-se um aumento no desempenho total do sistema.

O projeto de pás de rotores eólicos envolve muitas considerações, algumas das quais podem ser classificadas em aerodinamicamente críticas e, outras, em estruturalmente críticas.

O desenvolvimento científico e tecnológico, sob o ponto de vista aerodinâmico e, também, estrutural, assume um caráter importante no que diz respeito a utilização de aerofólios avançados, instrumentos de controle aerodinâmico, ensaios estruturais, pesquisa de novos materiais, controladores eletrônicos e modelagem de sistemas híbridos.

Os novos projetos de turbinas eólicas dão ênfase principalmente ao efeito do estol aerodinâmico, aos efeitos estruturais e a fadiga, utilizando-se aerofólios avançados adaptados para aplicações em rotores eólicos. Esses

aerofólios ao mesmo tempo em que aumentam a capacidade de captação de energia e melhoram a eficiência de operação dos rotores das turbinas, ao aumentar a potência para um dado empuxo do rotor, reduzem a sensibilidade dos aerofólios à rugosidade, que naturalmente se acumula durante a operação. A tecnologia tem se desenvolvido e, atualmente, usa controladores eletrônicos para permitir que a operação do rotor com velocidade variável aumente a eficiência. Os instrumentos de controle aerodinâmico, como *'ailerons'* e *'flaps'*, estão sendo explorados para modular a potência aerodinâmica ou parar o rotor em condições de altas velocidades de vento. Estas tendências e configurações futuras de turbinas estão sendo pesquisadas atualmente em todo mundo.

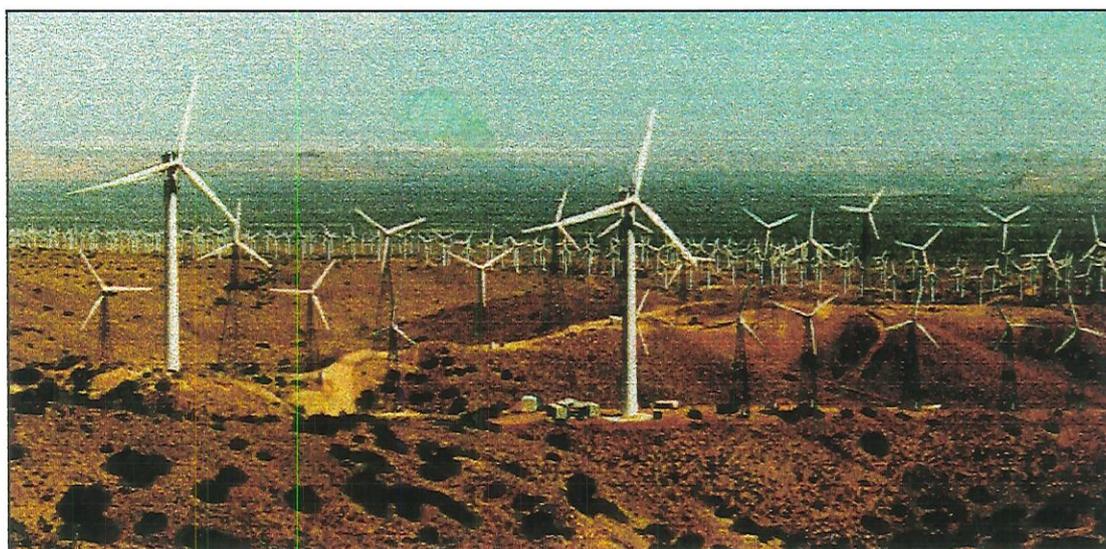


FIGURA 1.2 - Imagem de um campo eólico europeu com turbinas do tipo eixo horizontal com 3 pás.

1.2.1.1. - Controles Aerodinâmicos

A maioria das turbinas usam duas estratégias para controlar a potência máxima: controle por estol ou controle por passo. O controle por passo regula a potência do rotor através do uso de um instrumento mecânico

dentro do rotor, que muda o ângulo das pás. Os rotores controlados por estol usam a tendência do fluxo para desprender-se das pás em altas velocidades de vento e para regular a potência máxima em ventos fortes. (Quando o fluxo se separa sobre parte da pá, resulta em mudanças rápidas das forças aerodinâmicas, reduzindo a produção de energia).

O controle também pode ser conseguido com uso de “*aileron*s” e desviando o rotor da direção principal do vento. Outras estratégias de controle de altas velocidades incluem sistemas de freio mecânico, freios de arrasto aerodinâmico e sistemas elétricos de freio dinâmico (THRESHER & HOCK, 1994).

Para BANNISTER & FAWKES (1989), um instrumento de controle de velocidade rotacional passivo (torção da pá) é um artefato desejável para reduzir a complexidade mecânica da turbina. Esses autores realizaram ensaios em túnel de vento, para estabelecer a viabilidade do uso de “*spoilers*” pneumáticos numa turbina eólica de 1,8 m de diâmetro. Segundo eles os resultados confirmam a praticabilidade da técnica e ensaios posteriores em campo e em túneis de vento encontram-se em andamento, visando a desenvolver a idéia para turbinas em escala comercial.

1.2.1.2 - Características de Aerofólios

Há alguns anos, o desenvolvimento de novos aerofólios projetados especialmente para rotores de turbinas eólicas tem recebido considerável atenção. Esses aerofólios têm características diferentes dos usados na aviação. Na Europa, o trabalho, nesse campo, tem sido realizado no Reino Unido (HILL & GARRAD, 1989 e SATCHWELL & TURNOCK, 1989) e na Suécia (BJÖRCK, 1990). Esses estudos, juntamente com o do Instituto NREL nos Estados Unidos, certamente têm contribuído para uma visão mais clara dos requisitos de aerofólios de rotores eólicos.

A tendência de se utilizar aerofólios mais espessos para reduzir o carregamento leva a uma espessura com mais de 21% da corda, sobre grande parte da pá. Um aerofólio de 25% de espessura pode ser usada num dado local da envergadura médio em que o mesmo apresenta: altas relações L/D; um coeficiente de sustentação de pico de aproximadamente 1,5 (que é relativamente alto para uma dada seção espessa); comportamento uniforme do estol e baixa sensibilidade à rugosidade. Para um aerofólio localizado na região da raiz da pá, é necessário apenas um alto coeficiente de sustentação máximo (TIMMER & ROOY, 1991).

De acordo com TIMMER & ROOY (1991), o desenvolvimento de novos aerofólios começou com o projeto e ensaio de um aerofólio de 25% de espessura para a parte próxima ao cubo, como uma tentativa de aumentar a espessura dos aerofólios gerais da aviação: NACA SÉRIE 63 e 64, desenvolvidos nos anos 40. Segundo os autores, a análise numérica dos aerofólios NACA SÉRIE 63 e 64 de 6 dígitos mostraram que as partes espessas dessas famílias de aerofólios sofrem uma intensa diminuição do desempenho, no caso de perturbação do fluxo da região da ponta, cuja verificação foi feita, em túnel de vento, no aerofólio NACA 63(421)-425 de 25% de espessura. Eles afirmaram ainda que, devido a forma sistemática dos aerofólios NACA serem construídos (ao combinar a linha média de 'camber' positivo e a distribuição da espessura), todos os aerofólios NACA espessos são muito sensíveis à sujeira e às imperfeições de contorno na região da ponta. Assim, para assegurar o peso e diminuir os custos de material, as pás de turbinas eólicas modernas tendem a ser construídas de forma mais espessa. Os aerofólios com espessura relativa máxima de 25% ainda aparecem na metade da pá, o que aumenta a influência das características aerodinâmicas de aerofólios espessos sobre a eficiência do rotor. O novo aerofólio de 25% de espessura foi designado como DU-91-W2-250 e ensaiado na Universidade de Delft, num túnel de vento de baixa turbulência.

BJÖRCK (1989) apresenta um estudo sobre o desenvolvimento de novos aerofólios no Instituto de Pesquisa Aeronáutica da Suécia, lembrando que é uma tentativa de conceber aerofólios com boas características tanto no caso de fluxo laminar como no turbulento, sem comprometer o desempenho se as superfícies forem lisas. Segundo ele, o projeto baseou-se na operação do rotor com uma relação de velocidade na ponta constante, implicando, teoricamente, num coeficiente de sustentação (ou ângulo de ataque) constante em cada estação da pá, para todas as velocidades de vento.

Nesse trabalho de BJÖRCK (1989) foram colocadas, como ponto de partida do estudo, as características desejáveis de um aerofólio que, segundo ele, podem ser divididas em propriedades estruturais e propriedades aerodinâmicas. Estruturalmente, a espessura e a forma do aerofólio são os parâmetros mais importantes. Já as propriedades aerodinâmicas a serem consideradas são: relação sustentação-arrasto, coeficiente de sustentação do projeto, coeficiente de sustentação máximo e comportamento do estol, baixa sensibilidade à diminuição do desempenho devido a rugosidade do bordo de ataque e momento de *'pitching'*.

A relação sustentação-arrasto é o parâmetro aerodinâmico que influi diretamente na potência numa dada condição de operação do rotor. Uma diminuição dessa relação (L/D) é uma das primeiras desvantagens, com o aumento relativo da espessura do aerofólio.

O ganho de desempenho, por aumento da relação L/D , é uma função crescente do raio da pá, o que significa dizer que altas relações L/D não são tão importantes à frente da raiz da pá do rotor. O problema com os aerofólios espessos, logo após a raiz, não é primeiramente seu L/D relativamente baixo, mas seu coeficiente de sustentação normalmente baixo. Um outro fato interessante a ser observado, é que o ganho de desempenho por unidade de aumento de L/D é uma função decrescente desse L/D .

A escolha do coeficiente de sustentação de projeto é influenciado pelo fato de que a corda da pá (para uma dada relação de velocidade e raio) varia inversamente com o coeficiente de sustentação. Sabe-se que é desejável altas relações sustentação-arrasto e estas são atingidas mais facilmente com coeficientes de sustentação altos. No entanto, como a corda da pá varia inversamente com o coeficiente de sustentação, o número de Reynolds local diminui se o coeficiente de sustentação de projeto aumentar. A espessura relativa do aerofólio numa dada estação da pá também aumentará com o coeficiente de sustentação de projeto se o peso tiver que ser mantido constante BJÖRCK (1989).

O coeficiente de sustentação máximo, o comportamento no estol, bem como a baixa sensibilidade à rugosidade do bordo de ataque serão discutidos mais adiante de forma mais detalhada.

Para GIGUÈRE & SELIG (1997), o desenvolvimento de novos aerofólios para turbinas eólicas de eixo horizontal reguladas por passo recebeu pouca atenção na literatura. Um dos poucos estudos realizados foi o de BJÖRCK (1989), citado anteriormente, e mais recentemente o de JAMIESON & RAWLINSON-SMITH (1994). Como um avanço para identificar as características desejáveis de aerofólios de turbinas eólicas, eles apresentam um estudo sistemático envolvendo o projeto de dez aerofólios e sua aplicação subsequente para uma turbina eólica de 3 pás, com velocidade variável, diâmetro de 48,8 m e potência gerada de 750 KW.

JACKSON & MIGLIORE (1987) apresentaram através de um estudo realizado, um parâmetro de escolha das características dos perfis a serem utilizados em rotores de pás fixas controladas por estol. Eles afirmam que na região próxima à ponta da pá, deve-se utilizar aerofólios com coeficientes de sustentação máximos reduzidos, menores do que os encontrados em aerofólios para aplicação aeronáutica. Isso provoca a redução da potência máxima gerada por um dado rotor, na ocorrência de ventos fortes.

Pode-se, assim, aumentar ligeiramente o diâmetro do rotor para aumentar a geração de energia no regime de vento mais freqüente, sem elevar a máxima potência gerada. Evita-se, por conseqüência, o projeto de um gerador e sistemas de transmissão mais robusto; além de aumentar, simultaneamente, a produção de energia do sistema eólico como um todo.

Na região da pá próxima ao cubo, o uso de aerofólios com valores do coeficiente de sustentação máximo mais elevado do que os utilizados na ponta da pá, proporciona um aumento do coeficiente de potência em condições de operação próximos ao ponto de projeto, propiciando novamente um aumento na energia gerada pelo sistema.

Nas seções mais internas, devem-se utilizar aerofólios com valores elevados do coeficiente de sustentação máximo e arranjar a distribuição de torção, de tal forma a proporcionar uma melhor performance na ocorrência de ventos fracos, e produzir uma geração constante de potência na ocorrência de altas velocidades do vento.

Pelas considerações anteriores, pode-se perceber a importância do coeficiente de sustentação máximo na limitação da máxima potência gerada por um rotor de pás fixas. Outro parâmetro importante é a relação entre o coeficiente de sustentação e arrasto do aerofólio, o qual deve ser mínimo, como demonstrado pelas FIGURAS 1.3 e 1.4 (utilizadas para análise da influência do número de pás e razão de velocidades total no desempenho do rotor). O rendimento do rotor é tanto menor quanto mais elevado for o coeficiente de arrasto do perfil.

Além das características discutidas, o aerofólio escolhido deve diminuir, o mínimo possível, seu desempenho, devido a deposição de insetos, poeira e outras partículas em sua superfície, fato comum nas pás de rotores eólicos, principalmente, nos de pequeno porte, por estarem localizados mais próximos ao solo (ALVES, 1997).

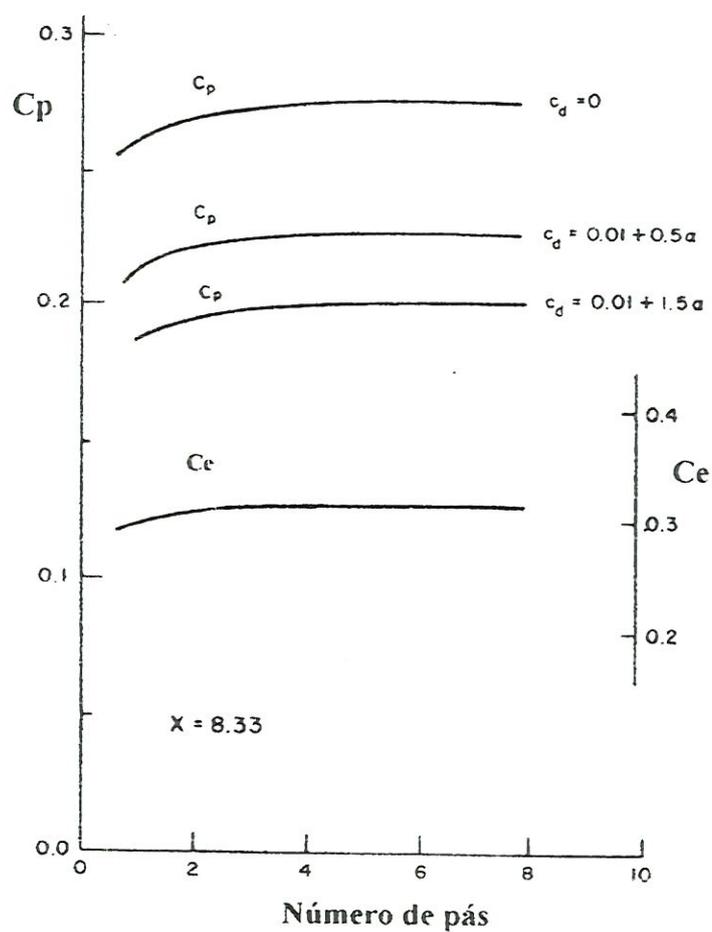


FIGURA 1.3 - Efeito do número finito de pás sobre o coeficiente de potência (C_p) e empuxo (torque) (C_e). EGGLESTON & STODDAR

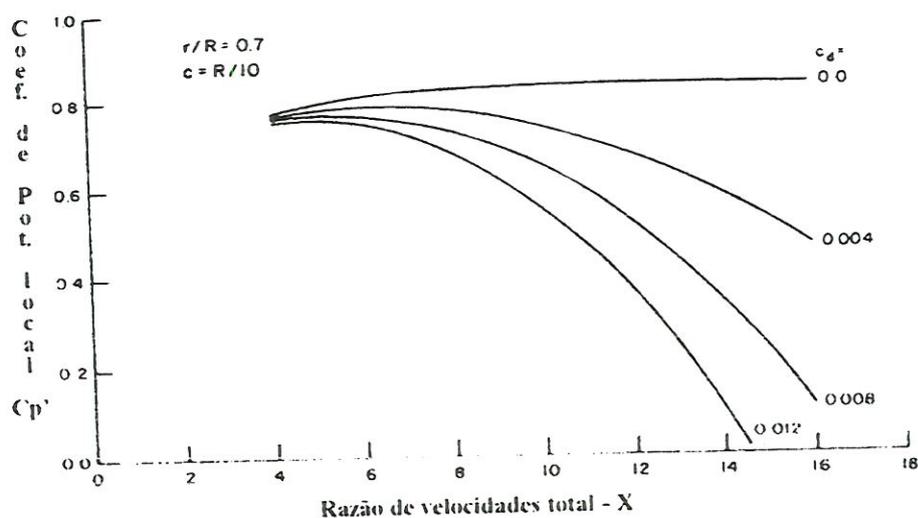


FIGURA 1.4 - Variação do coeficiente de potência com o coeficiente de arrasto. EGGLESTON & STODDARD

Segundo TANGLER et al. (1985) que apresentam em seu trabalho a curva de potência medida para dois rotores de três pás fixas e com potência de projeto de 65kw, operando no mesmo local (FIGURA 1.5 e 1.6), é importante a escolha criteriosa das características dos aerofólios utilizados em rotores eólicos.

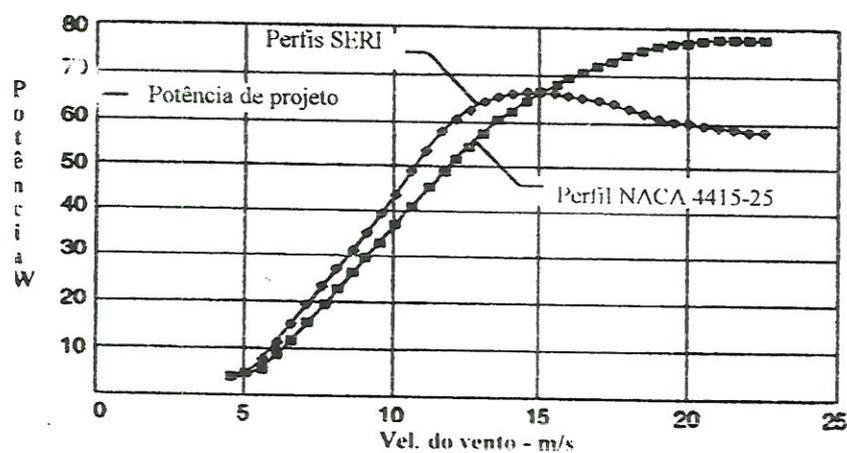


FIGURA 1.5 - Curvas de Potência (experimentais) com pás lisas (ou limpas). TANGLER et. al.

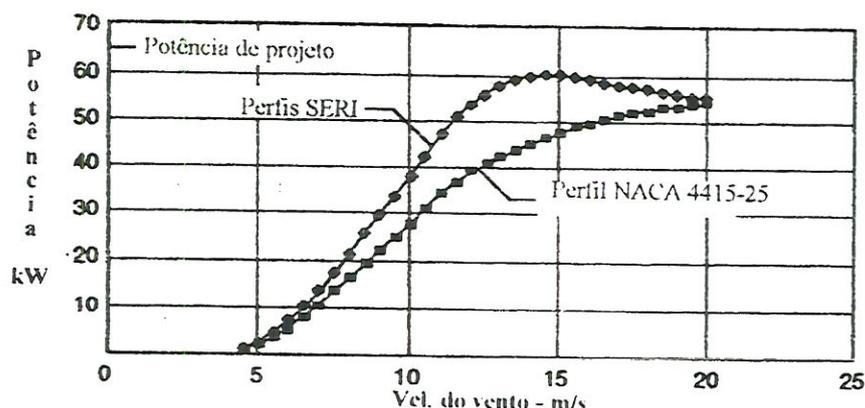


FIGURA 1.6 - Curvas de Potência (experimentais) com pás rugosas (ou sujas)
TANGLER et. al.

Assim, percebe-se que é difícil especificar antecipadamente o conjunto de aerofólios que será mais eficiente para uma dada condição de projeto. Então, segundo ALVES (1997), a estratégia aconselhada é escolher um conjunto de aerofólios “candidatos”, de acordo com os critérios estabelecidos no trabalho de JACKSON & MIGLIORE (1987), e avaliar como se dá a performance do rotor, mudando-se a distribuição de corda e torção ao longo da pá.

1.2.1.3 - A rugosidade e o desempenho da turbina

Para RODRIGUES & RESTIVO (1989), a previsão do desempenho das turbinas eólicas de eixo horizontal é uma questão relevante, principalmente por causa das discrepâncias observadas entre os resultados calculados e medidos, conforme exemplo de MILBOROW (1985). Por um lado, o problema não é de fácil solução devido à dificuldade em simular numericamente o fluxo ao redor da turbina, e por outro, devido às limitações geralmente encontradas, quando se tenta reproduzir o fluxo real nas condições controladas cuidadosamente no laboratório.

RODRIGUES & RESTIVO (1988) executaram uma série de ensaios em condições de fluxo uniforme de baixa turbulência, cobrindo uma

faixa de ângulos de ataque, em número de Reynolds muito baixos (cerca 100.000), para uma série de perfis. Neste trabalho, além da observação de alguns aspectos relevantes do comportamento do rotor, eles também coletaram dados representativos do desempenho de um rotor completo, cuja pá foi escolhida entre os perfis NACA.

O modelo ensaiado no túnel de vento foi projetado de acordo com JANSEN & SMULDERS (1980), para ter um desempenho ótimo numa relação de velocidade da ponta de aproximadamente 4, com 3 pás (perfil NACA 4412). Segundo os autores, a forma resultante foi muito difícil de se fabricar e algumas simplificações foram introduzidas, como a linearização da corda e da torção. De acordo com as conclusões levantadas desse trabalho, as curvas de desempenho são muito sensíveis à turbulência gerada na camada limite da superfície da pá. A turbulência induzida, provocada pelo uso de uma faixa de fita montada ao longo da lateral de sucção das pás, produz significativas mudanças do torque e da potência.

A experiência tem mostrado que as turbinas eólicas são propensas a diminuição do desempenho devido ao acúmulo de sujeira e de insetos próximo ao bordo de ataque das pás. Como estas operam na camada atmosférica, ficam mais suscetíveis à sujeira, tornando-se um caso especial a ser estudado.

A rugosidade é um problema universal que preocupa fabricantes e pesquisadores, uma vez que contribui significativamente para baixar a produção de energia. A FIGURA 1.7 apresenta a importância desse efeito, verificado em ensaios de um rotor eólico de 10 metros de diâmetro, e mostra a diminuição de potência gerada em pás rugosas pela sujeira.

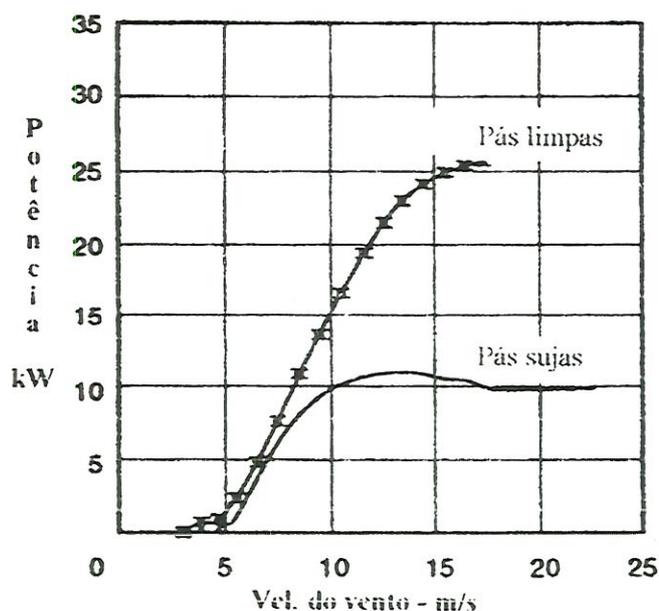


FIGURA 1.7 – Efeito da rugosidade sobre o desempenho de um rotor eólico de pequena escala. LISSMAN (1994)

MUSIAL et al. (1990) realizaram um trabalho de pesquisa, cujo objetivo foi determinar a sensibilidade de uma aerofólio S809 à rugosidade de uma pá de um rotor eólico. Examinaram esse efeito ao compararem diversos parâmetros, e usarem medidas de distribuição de pressão, para determinar o efeito da rugosidade sobre os coeficientes de sustentação e de arrasto, e sobre as forças aerodinâmicas do aerofólio.

Eles também afirmam que nas turbinas eólicas, cuja potência e carga são controladas pelo estol aerodinâmico, os aerofólios que operam durante e depois do estol passam por diversos problemas. Primeiro, há muito pouco dado sobre o desempenho do aerofólio acima em túnel de vento, relativo ao coeficiente de sustentação; depois, ainda não estão claros os efeitos tridimensionais que mudam as propriedades da seção do aerofólio na região da ponta. Quando as superfícies do aerofólio tornam-se rugosas, pelo acúmulo de inseto e sujeira, esta incerteza aumenta.

Já SOMERS & TANGLER (1996) realizaram trabalho sobre um aerofólio espesso com alto coeficiente de sustentação máximo, projetado para baixar a sensibilidade aos efeitos da rugosidade do bordo de ataque.

Projetaram, então, o aerofólio S814 com 25% de espessura, para acomodar considerações estruturais e aerodinâmicas na região da raiz da pá de uma turbina eólica. Em seguida, fizeram os testes bidimensionais do aerofólio da raiz (com 24% de espessura), num túnel de vento de baixa turbulência. Os dados foram medidos com transição livre e transição forçada com número de Reynolds de 0,7, 1,0, 1,5, 2,0 e $3,0 \times 10^6$. Verificou-se que com a transição forçada o coeficiente de sustentação foi menor do que com a transição livre, demonstrando uma sensibilidade mínima aos efeitos de rugosidade. O programa usado para análise e projeto do aerofólio foi o EPPLER (EPPLER, 1990).

Segundo HILL & GARRAD (1989), pouco se sabe sobre o projeto de aerofólios com baixa sensibilidade à rugosidade. Eles afirmam ainda que a modelagem da rugosidade não recebeu grande atenção no campo geral do comportamento do aerofólio e que a pesquisa na literatura falhou quanto à produção de qualquer informação sobre a geometria necessária de um aerofólio, para torná-lo menos sensível à rugosidade. No entanto, segundo eles, há evidências que sugerem que a geometria do bordo de fuga é uma característica vital do aerofólio com baixa sensibilidade à rugosidade. A explicação física disso é dada por PEARCY (1955), que mostrou que a geometria da superfície inferior próxima ao bordo de fuga tem um efeito significativo sobre o desempenho da seção, quando a superfície superior é submetida à separação. A rugosidade promove a separação na superfície, sendo possível melhorar o desempenho de um aerofólio, com o projeto cuidadoso daquela área. PEARCY sugere que, se adequadamente projetado, o fluxo da superfície inferior fica protegido dos efeitos prejudiciais do fluxo separado sobre a superfície superior. Torna-se evidente que um fato importante a ser observado é que a pressão da superfície superior no bordo de fuga cai quando ocorre a separação. Sabendo-se que a rugosidade promove a separação num determinado aerofólio, e mesmo quando o fluxo permanece

colado, a adição de rugosidade provoca a queda de pressão da superfície superior. Os resultados dele mostram que o ângulo que a superfície inferior, no bordo de fuga, faz com o fluxo é um parâmetro fundamental, que determina o nível de proteção a ser obtido.

Para MUSIAL et al. (1990), os efeitos da rugosidade sobre os aerofólios de turbinas eólicas são comumente quantificados, ao se examinar a influência sobre a curva de potência de um dado rotor (FIGURA 1.7). Embora este método seja seguro e preciso na determinação do impacto sobre a captação de energia de uma certa turbina, não fornece muita informação sobre as mudanças de propriedades aerodinâmicas do aerofólio. Se existirem dados bidimensionais em túneis de vento para o aerofólio rugoso, estes podem ser usados para prever a diminuição de desempenho na região antes do estol; ainda não houve sucesso na tentativa de prever precisamente o desempenho nas regiões de estol e pós-estol, usando dados bidimensionais. Medidas tiradas diretamente do rotor girando dão imagens mais claras de como a rugosidade afeta as propriedades do aerofólio.

BJÖRCK (1989) em seu trabalho sobre rugosidade, afirma que, se a camada limite sobre um aerofólio for submetida a transição prematura pela rugosidade do bordo de ataque, o arrasto aumentará. Isto é inevitável, segundo ele, pois o atrito da superfície da camada limite turbulenta é muitas vezes maior do que sua contrapartida laminar. Mas também, com a transição prematura a camada limite será mais espessa um pouco distante à jusante, do que seria se a camada limite fosse laminar. A recuperação de pressão, começando com a camada limite mais espessa, tornar-se-ia mais propensa à separação e, se a camada limite se separa, um termo extra de arrasto de forma é acrescentado ao arrasto do aerofólio. Para o projeto dos aerofólios da FFA (*The Aeronautical Research Institute of Sweden*), a baixa sensibilidade à rugosidade do bordo de ataque teve o seguinte significado: até um certo ângulo

de ataque o aerofólio tem uma tal distribuição de pressão que a camada limite não se separa com o bordo de ataque rugoso.

Conforme citado por HILL & GARRAD (1989), há muita dificuldade na modelagem da rugosidade. No entanto, para ajudar nessa modelagem existe a chamada **rugosidade padrão NACA** que foi criada para simular a distribuição de rugosidade típica experimentada por aeronaves. Este padrão, para BRAGG & GREGOREK (1989), consiste de uma distribuição uniforme de partículas entre o bordo de ataque e até 8% da linha de corda nas superfícies inferior e superior do aerofólio.

O tamanho da partícula é definido pela relação adimensional do seu diâmetro (k) dividido pelo comprimento da corda (c). Como as condições de operação para turbinas eólicas são bem diferentes daqueles das aeronaves, MUSIAL (1990) lembra o fato de que as turbinas operam na camada atmosférica próxima ao solo, em baixo Reynolds, e são freqüentemente limpas, tendo, conseqüentemente, rugosidade não tão severa, quanto ao acúmulo de insetos observados.

Em um trabalho mais recente, TANGLER (1997) apresenta um estudo para determinar a influência de parâmetros geométricos da pá, tais como torção, passo e “*camber*” sobre a sensibilidade da pá à rugosidade do bordo de ataque. Em sua análise, ele afirma que a rugosidade do bordo de ataque diminui as características de sustentação do aerofólio de duas formas. O efeito mais significativo é a redução no coeficiente de sustentação máximo. À medida que o ângulo de ataque aumenta e o coeficiente de sustentação atinge o máximo, o gradiente de pressão adverso na superfície de sucção do aerofólio torna-se mais severo e suscetível a ser perturbado pela rugosidade. A inclinação da curva de sustentação do aerofólio também é adversamente afetada pela rugosidade. Além disso, a rugosidade leva a um arrasto maior do aerofólio. Estes fatores contribuem para a perda de desempenho do aerofólio devido a rugosidade. No entanto, a principal contribuição para perda de

potência, devido a rugosidade, é a redução do coeficiente de sustentação máximo.

1.2.1.4 - O Processo de Estol

As estimativas da potência são calculadas quase sempre de programas baseados na Teoria do *Momentum*/Elemento da pá, que assume que o fluxo local ao redor das seções da pá segue um comportamento bidimensional e iguala-se aos carregamentos locais dos dados tirados da seção bidimensional, com mudanças de quantidade de movimento na esteira. Na prática, tais métodos mostram-se bem adequados para condições de alta velocidade na ponta (baixa incidência), mas falham no regime limitante do estol, subestimando a potência de pico e prevendo um estol mais cedo do que o sugerido pela curva de potência medida. Os métodos de modelagem do fluxo tridimensional mais sofisticados, ainda não tiveram sucesso suficiente para tornar-se ferramenta de projeto num futuro imediato. Movidos por essas dificuldades, uma série de estudos experimentais, com rotores em escala real e modelos em túneis de vento, têm sido realizados para examinar a aerodinâmica do processo de estol. A observação comum desses estudos é a existência de um fenômeno de atraso do estol, resultando em coeficientes de sustentação máximos acentuados, particularmente na parte mais interna (próximo ao cubo) da pá.

A previsão da potência para turbinas eólicas de eixo horizontal reguladas pelo estol, usando a Teoria do Elemento da Pá, tem, na prática, mostrado ser muito insatisfatória. A deficiência dessa Teoria simples torna-se, particularmente, séria à medida que a turbina move-se no regime estolado, acima da condição de potência de pico, quando os efeitos tridimensionais são importantes. Uma das hipóteses lançadas é que o fluxo radial na camada limite provoca uma redução da separação na superfície de sucção da pá, levando a

coeficientes de sustentação máximos efetivos bem acima dos valores bidimensionais (BARNSELY & WELLCOME, 1989).

WOOD (1991) apresenta um trabalho sobre análise tridimensional do atraso do estol numa turbina eólica de eixo horizontal, com pás sem torção e corda constante, mantendo assim um modelo tão simples quanto possível. Segundo ele, há evidências de que o fenômeno de atraso do estol ocorre nas turbinas em operação. TANGLER (1989) comparou o desempenho em campo de uma pequena turbina, para uma série de previsões baseadas na Teoria do Elemento da Pá.

Na Teoria do Elemento da Pá, as pás são modeladas como linhas de vórtices de circulação constante; assim, a única forma de incluir uma seção particular é usar suas características bidimensionais.

De acordo com SCHLICHTING (1978), o atraso do estol é consequência das forças centrífugas e de Coriolis agindo dentro da camada limite da pá.

De acordo com as medidas de rendimento de potência de uma turbina eólica, observou-se que mais potência é gerada, sob certas condições de alto vento, do que seria previsto pela Teoria do Elemento da Pá. Esse excesso de potência foi atribuído ao atraso do estol, devido aos efeitos de rotação, conforme descoberta de HIMMELSKAMP (1950), num propulsor intensamente carregado. Uma possível explicação do efeito é que os gradientes de pressão transversal na camada limite são fixados pela rotação e estas agem e atrasam o estol (BROWN & GRAHAM, 1989).

Para BUTTERFIELD (1989), muitas turbinas experimentam o estol aerodinâmico durante as condições normais de operação em pequenas e até grandes porções da pá. A maioria delas usam o estol para regular a potência de pico e o carregamento. A operação dos aerofólios no estol e depois deste acarretou diversos problemas. Primeiro, há muito poucos dados em túnel de vento sobre o desempenho do aerofólio acima do coeficiente máximo de

sustentação e, como as turbinas operam em ângulos de ataque muito altos, isto leva a estimar o desempenho dos aerofólios entre 12° e 30° . Acima de 30° a teoria da Placa Plana pode ser usada. Em segundo lugar, o desempenho do estol de um aerofólio usado numa pá girando parece ser modificado pelos efeitos do fluxo tridimensional. É comum os projetistas de turbinas eólicas subestimarem o desempenho e as cargas de pico. Parte disso porque são poucos os dados dos aerofólios, mas também porque há um efeito adicional causado pela rotação da pá.

Para os cálculos aerodinâmicos de turbinas eólicas, é comum se usar os dados bidimensionais do aerofólio. Especialmente na região onde ocorre o estol, há uma significativa diferença com os dados medidos dos rotores, que indicam um fluxo radial e estol em ângulos de ataque mais altos. Isto significa que o fluxo ao redor da pá do rotor é realmente tridimensional, podendo ser atribuído ao comprimento limitado e a mudança de torção e conicidade na direção ao longo da envergadura, e à rotação da pá. O efeito desse primeiro item é importante nas regiões da ponta e da raiz da pá. Para uma asa fixa de uma aeronave, uma simples correção da sustentação e do arrasto é possível, utilizando a Teoria da Linha de Sustentação de Prandtl. Para uma turbina eólica, a situação é mais complicada, devido a rotação, mas também se usa o fator correção da ponta de Prandtl, especialmente para situação em que está girando. O fluxo ao redor da ponta da pá tem os efeitos mais importantes; o fluxo ao redor da raiz da pá tem pouca influência sobre o desempenho total do rotor e carregamento da pá. Atualmente, os efeitos geométricos são considerados até certo ponto nos métodos de cálculo padrão do desempenho do rotor. Os efeitos devido a rotação da pá não foram até então implementados, devido a insuficiência de dados experimentais (BRUNING e TIMMER, 1992).

1.2.1.5 - Desempenho Aerodinâmico

A Teoria da Quantidade de Movimento (*Momentum*) aplicada a propulsores (a chamada Teoria Rankine-Froude) supõe que o propulso pode ser representado por meio de um disco atuador plano e infinitamente fino de raio R , que suporta uma diferença de pressão uniforme em sua superfície (FIGURA 1.8).

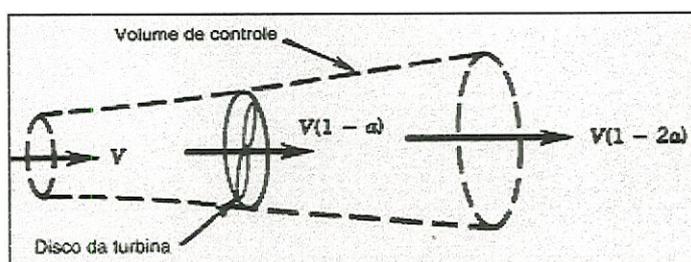


FIGURA 1.8 - Ilustração do escoamento sobre o disco atuador. FOX e McDONALD

Outra suposição relacionada a esta teoria é: o disco é imerso num tubo de corrente coaxial bem definido. Dentro deste tubo de corrente, o fluxo é considerado praticamente unidimensional. O fluido é incompressível. A rotação do fluxo imposta pelo propulsor não é considerada. A pressão estática, infinitamente antes e depois do disco atuador é constante e igual a pressão estática da corrente livre.

BETZ (1927) aplicou a teoria ao caso de uma turbina eólica de eixo horizontal. Como a turbina extrai energia cinética do vento, o tubo de corrente que atravessa o disco torna-se mais largo à medida que atravessa o disco. Por analogia com a teoria de Rankine-Froude, Betz supôs que o ar dentro do tubo decorrente flui sem perdas de pressão. Assim, é possível aplicar a Equação de Bernoulli na região que compreende antes e até próximo ao disco, e logo depois deste, em uma região mais adiante (PRADO, 1995).

Assim, o desempenho aerodinâmico de um rotor eólico, em função das curvas $C_p \times \lambda$ ou $C_T \times \lambda$, é calculado considerando a contribuição de cada elemento da pá, geralmente dividida em diversas seções ou estações. Este desempenho depende da faixa de velocidade do vento (MEDEIROS et. al. , 1996).

1.2.1.6 - Ensaios Bi e Tridimensionais

De acordo com BRUNING e TIMMER (1992), o fato de uma mesma pá do rotor ser medida na situação parada (bidimensional) e na situação girando (tridimensional) tem grandes vantagens: não existem incertezas das características bidimensionais da pá do rotor; na situação girando o ângulo de ataque correto é difícil determinar corretamente. Supondo que os efeitos de rotação sobre a distribuição de pressão da pá nos primeiros 10% a 20% da pá sejam pequenos, o ângulo de ataque é determinado com as características da distribuição de pressão nos primeiros 20% da corda.

PULSEN (1989) questiona o uso dos coeficientes da sustentação e arrasto bidimensional no cálculo da potência do rotor de uma turbina eólica, uma vez que, segundo ele, este método subestima a potência do rotor e superestima os momentos de curvatura da pá relativos à medidas no conversor da turbina. As medidas feitas por HIMMELSKAMP (1950), durante a Segunda Guerra Mundial, num propulsor girando, mostrou os efeitos favoráveis da camada limite na seção da raiz do propulsor, que resultou em coeficientes de sustentação mais altos do que aqueles obtidos em ensaios bidimensionais em túnel de vento. PULSEN (1989) também mencionou que a introdução do conceito de energia renovável pôs em evidência as descobertas experimentais, com pesquisadores alertando para a diferença entre os resultados teóricos e experimentais da potência e do torque.

1.2.2 - Projeto de Turbinas

No tocante à pesquisa eólica sobre sistemas de controle, LEITHEAD et. al. (1989) apresentaram um trabalho cujo objetivo era explicar o desenvolvimento e a validação de uma simulação de turbina eólica, adequada para fins, tais como a investigação do sistema de controle. Segundo eles, uma turbina eólica tem muitas características importantes apresentadas nas simulações: a aerodinâmica é não linear, o sistema é de um modo geral rígido e a força de atuação é estocástica; isto tem séria implicação para a convergência do algoritmo numérico. Os resultados do modelo devem ser validados para demonstrar que a simulação na verdade se aproxima do caso real antes de ser usado de forma preditiva. Eles afirmam que os pesquisadores freqüentemente modelam em detalhe características específicas, tais como pás, aerodinâmica, dinâmica estrutural, geradores, carga, sistema hidráulico e sistemas de controle. Cada característica contribui para o desempenho total no final.

Para HAGG (1989), o projeto de uma turbina eólica é um processo crescente e interativo, partindo da especificação rigorosa pelo cliente ou pelo mercado. Para completar a eficiência do processo, o projeto deve ser dividido em estágios com detalhes e segurança, para evitar problemas que possam aparecer em estágios posteriores. Nos primeiros estágios os conceitos são mais ou menos livres de escolha e todas as alternativas são rigorosamente examinadas. Nestes estágios, as ferramentas de análise simples mas suficientemente precisas, podem ser usadas para otimizar e estabelecer o conceito sobre o nível do sistema. Muitas dessas ferramentas se baseiam na experiência e se desenvolvem durante o projeto.

O método para reduzir a potência ou a velocidade de rotação, ao girar a turbina no vento, foi muito usado para turbina de pequeno e médio porte. O interesse para introduzir este método em grandes turbinas aumentou

nos últimos anos. Para minimizar o risco e reduzir o custo no projeto e operação de uma turbina com controle de “yaw”, é necessário ter ferramentas teóricas seguras para prever o comportamento da turbina com relação às forças e movimentos.

No projeto de turbinas eólicas de eixo horizontal, é importante entender todas as cargas vibratórias, atuando nas pás. Quando se utilizam pás mais flexíveis, a excitação causada pela gravidade pode levar a instabilidades conhecidas como ressonâncias paramétricas.

A tendência da nova geração de turbinas, usando pás mais flexíveis, pode reduzir substancialmente o custo de capital envolvido, e conseqüentemente o custo da eletricidade gerada. Porém, a introdução dessas pás mais flexíveis significa que o rotor é mais suscetível a muitos tipos de instabilidades. A ressonância paramétrica é uma dessas instabilidades que devem ser consideradas durante a fase do projeto, para evitar as tensões cíclicas (FEITOSA, 1989).

Dessa forma, FEITOSA e MEAD (1989) apresentaram um trabalho que, segundo eles, se concentra na determinação das regiões de ressonância paramétrica de turbinas eólicas de eixo horizontal. Para tanto, foi projetado um modelo com 1,82 m de diâmetro, com possibilidade de variação de parâmetros significativos como: ângulo de incidência da pá; ângulo de coneamento da pá; flexibilidade da raiz da pá e características da torre.

ARRIETA (1996) apresenta um trabalho que aborda a metodologia empregada para projetar as pás de um rotor para uma turbina eólica de eixo horizontal, cuja potência máxima extraída é de aproximadamente 20 KW, a uma velocidade do vento de quase 12 m/s. Para que o rotor opere com sua potência em um amplo regime de ventos se emprega a técnica conhecida como “operação a uma velocidade específica constante”. Neste trabalho as pás tem um raio de 3m, as cordas variam de 0,475 m na raiz até 0,25 m na ponta, e o perfil adotado foi o EPPLER E212 (EPPLER, 1990);

o material adotado foi fibra de vidro com resina epóxi e com núcleo de espuma de poliuretano. O autor emprega uma análise por elementos finitos para determinar tensões, deformações e os modos naturais de vibração.

PÉREZ e CALISTO (1994) apresentam um modelo aerodinâmico e um “software”, que permite a otimização e aproveitamento de energia eólica, com uma turbina eólica de eixo horizontal. O “software” consiste em determinar a geometria do perfil que otimiza o coeficiente de potência da turbina, considerando a variação dos coeficientes de sustentação e arrasto, com o ângulo de ataque e a variação do número de Reynolds, e considerando também algumas hipóteses para simplificação do modelo como: fluxo estacionário, fluxo incompressível e fluido viscoso. A conclusão apresentada foi que, na análise de sensibilidade, as variáveis que mais influem no comportamento de uma turbina eólica de eixo horizontal são o ângulo de passo, o número de Reynolds e a solidez do rotor .

Já ALVES (1997) apresentou um estudo sobre a aerodinâmica de rotores eólicos de eixo horizontal, visando ao projeto e análise de pequenas unidades eólicas para o bombeamento d’água ou geração de energia elétrica. As principais abordagens para análise e projeto foram apresentadas com base no Método do Elemento da Pá / *Momentum*, que serviu de base também para implementação de um novo modelo.

Portanto, ao apresentar neste Capítulo uma vasta revisão da literatura sobre o desempenho das turbinas eólicas de eixo horizontal, quando estas são submetidas à infestação de insetos e de sujeira (rugosidade), sugere-se neste trabalho a análise do desempenho aerodinâmico de um modelo de turbina eólica submetido à várias faixas de aplicação da rugosidade (areia), bem como vários tamanhos de grãos como forma de simular a rugosidade em condições naturais.

CAPÍTULO 2 - TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL

A turbina eólica é um instrumento que utiliza o movimento natural do ar livre para produzir potência mecânica através da rotação do eixo. Os projetistas das pás usam várias combinações dos diferentes parâmetros disponíveis, os quais incluem a forma geométrica da pá, o número de pás, o passo (fixo ou variável) da pá e a relação de transmissão da engrenagem, na tentativa de conseguir uma eficiência mais alta, maior segurança e custo reduzido. As variações desses parâmetros são incorporadas numa série de configurações não convencionais.

A teoria de eficiência de turbinas eólicas é complexa e, em alguns casos, não é muito bem entendida. As características de eficiência das turbinas eólicas variam substancialmente de tipo para tipo e mudanças substanciais ocorrem com leves modificações aos parâmetros de projeto (WARNE,1983).

Reduzido ao seu termo mais simples, o rotor eólico, tipo propulsor, consiste de um número de pás dispostas radialmente em torno de

um eixo, ao qual elas se prendem, e que se liga paralelo à direção do vento de modo que as pás giram num plano aproximadamente normal a esta direção. O rotor é montado sobre uma estrutura de suporte, de modo a orientar-se no vento pela sua velocidade rotacional (Le GOURIÈRES,1980).

2.1 - Produção de um modelo

Tendo fixadas todas as dimensões sob controle do projetista, o passo seguinte é calcular o carregamento para distribuição de massa adotada, começando com as pás. Uma vez que as dimensões da unidade real são semelhantes aquelas da unidade de teste, a distribuição de massa das partes girantes pode ser considerada equivalente daquela unidade de teste.

As condições nas quais o carregamento deve ser calculado não são tão claras no caso de turbinas eólicas, devido à enorme gama de conhecimentos do comportamento do vento. Essas condições caem em duas classes gerais:

- (i) Quando em operação
 - (a) Condições de carregamento por fadiga
 - (1) Velocidade constante
 - (2) Velocidade variável
 - (b) Condição de carregamento máximo
- (ii) Quando fora de operação
 - (a) Condição em baixa rotação
 - (b) Condição engatada

As forças sobre as pás - tanto de massa, como aerodinâmica - podem ser expressas em função de certos coeficientes conhecidos e de movimentos desconhecidos do sistema.

Assim, é possível escrever equações diferenciais do movimento do sistema. A solução dessas equações dão as componentes do movimento desconhecidas, ou seja, deslocamentos, velocidades e acelerações. Estas

quantidades, quando multiplicadas por coeficientes adequados, fornecem os valores das forças de massa e aerodinâmicas.

Além da força de gravidade, as forças de massa associadas às seguintes acelerações são calculadas:

- (1) *A aceleração centrífuga rotacional*, que age radialmente ao longo de uma linha perpendicular ao plano, passando através do eixo de rotação da turbina;
- (2) *A aceleração tangencial rotacional*, que age ao longo de uma linha perpendicular ao plano, contendo a massa e o eixo de rotação da turbina;
- (3) *A aceleração centrífuga de coneamento*, que age ao longo de uma linha perpendicular, passando através do eixo de coneamento;
- (4) *A aceleração tangencial de coneamento*, que age ao longo de uma linha perpendicular ao plano, contendo a massa e o eixo de coneamento;
- (5) *A aceleração de Coriolis*, que age ao longo de uma linha paralela ao eixo de coneamento;
- (6) *A aceleração de passo ('pitching')*, que age ao longo de uma linha perpendicular ao plano, contendo a massa e o eixo de passo da pá.

As forças associadas às acelerações acima são dadas pelos produtos das massas respectivas e suas acelerações.

As forças aerodinâmicas são obtidas na forma de sustentação, arrasto e componentes de momento. Elas são calculadas numa quantidade suficiente de estações ao longo da pá, para permitir que curvas suaves sejam levantadas.

Todas as forças elementares são resolvidas em três componentes agindo respectivamente: paralelo ao eixo da pá; perpendicular ao eixo da pá e perpendicular ao eixo de coneamento; e perpendicular ao eixo da pá e paralelo ao eixo de coneamento (PUTNAM, 1948).

2.2 - Componentes do Sistema

2.2.1 – Rotor

As pás do rotor, geralmente formado de projeto de aerofólios convencionais, obedecem certas características aerodinâmicas. O número de pás pode variar de 1 a 12, podem ser cônicas, ter a mesma corda ao longo de todo o comprimento e, ainda, ter a forma plana ou torcida. Seu passo pode ser fixo ou variável, montados para liberar as tensões provocadas pelas mudanças rápidas de velocidades do vento.

O material usado para as pás deve ser leve e resistente e não ser submetido à deterioração intensa devido as condições climáticas. A madeira é muito usada para as pás sólidas de pequenos rotores. Outros tipos de materiais muito usados são: madeira de balsa, plástico, fibra de vidro, aço inoxidável ou liga de alumínio.

A construção da pá pode levar a dois tipos de problemas: em primeiro lugar, o estudo aerodinâmico da pá, a escolha do perfil, largura do perfil, ângulo de ataque, número de pás, etc. Em seguida, o dimensionamento da pá do ponto de vista da resistência dos materiais (LE GOURIÈRES, 1980).

2.2.2 - Gerador

O gerador constitui o elo de ligação entre a energia do vento e a energia elétrica. Com relação a isto há uma questão: decidir qual a dimensão do gerador que se deve escolher para um determinado diâmetro do rotor. Em primeiro lugar, há que se decidir qual a velocidade do vento necessária para que o gerador atinja a potência máxima. Se desejar que a potência máxima seja atingida a baixas velocidades do vento, deve-se utilizar uma hélice de grande

diâmetro, enquanto se a potência máxima só for atingida a altas velocidades, uma hélice pequena já é o suficiente.

2.2.3 - Torre

A torre é o elemento de suporte do rotor eólico. Pode ter forma geométrica variada. Atualmente, as torres tubulares são mais usadas que as torres tipo treliça.

Um aspecto importante relativo à torre é quanto a sua altura. O grau no qual a velocidade do vento aumenta ou diminui com a altura depende da topografia da região.

Alguns dos projetos mais ambiciosos envolvem torres com mais de um propulsor no alto (MERRIAN, 1979).

2.3 - Desempenho de Turbinas Eólicas - parâmetros

De acordo com o FOX (1995) o estudo do desempenho é feito através de dois grupos adimensionais: C_P (coeficiente de potência) e C_T (coeficiente de torque).

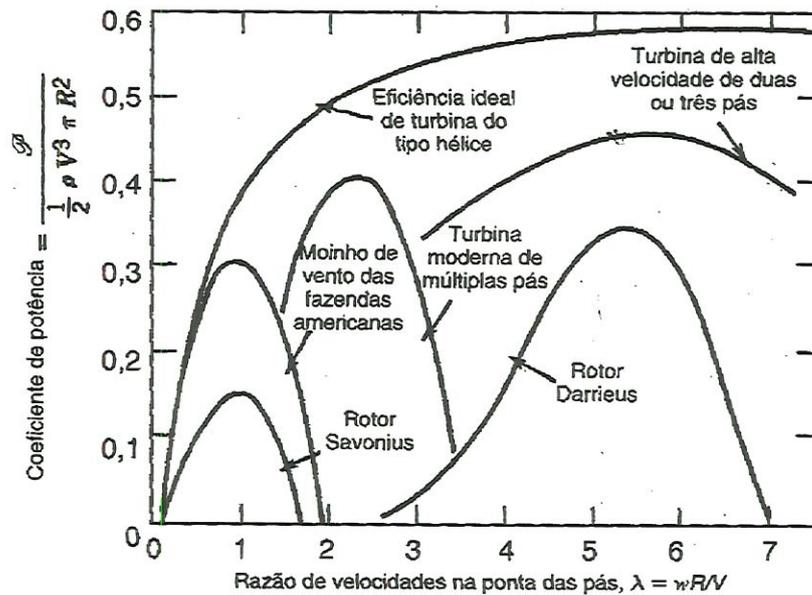


FIGURA 2.1 – Desempenho típico de turbinas eólicas.
FOX and McDONALD (1995)

Os rotores eólicos, tipo multipás, são restritos a aplicações, como o bombeamento d'água, devido a sua baixa velocidade rotacional. O tipo multipás e o tipo moinho de vento (DUTCH) desenvolvem alto torque em baixa velocidade rotacional, mas tem eficiência baixa porque o seu C_p é baixo, quando comparado aos rotores rápidos de 2 ou 3 pás. Os rotores rápidos e os de eixo vertical são mais eficientes porque as pontas das pás giram numa alta velocidade comparada à velocidade do vento. Esta é a chamada relação de velocidade da ponta, definida como a relação entre a velocidade angular na ponta e a velocidade do vento (KOVARIK, 1979).

2.3.1 - Coeficiente de Potência

$$C_P = \frac{P_t}{P_v} \quad (1)$$

$$C_P = P_t / \left(\frac{1}{2} \rho A V^3 \right) \quad (2)$$

onde

P_t - potência no eixo da turbina

P_v - potência eólica num tubo de corrente de área transversal igual a área varrida pela turbina

A - área transversal varrida pela turbina

ρ - densidade do ar

O coeficiente de potência de cada rotor eólico é a potência liberada pelo rotor, dividida pela potência total disponível no vento que chega na área varrida pelo rotor. O coeficiente de potência de uma turbina eólica ideal varia com a relação de velocidade da ponta e aproxima-se de um máximo de 0.593, ou 59.3% (chamado de limite de Betz), da potência total disponível no vento, quando a velocidade da ponta atinge um valor de 5 ou 6.

No entanto, cada projeto de turbina eólica deve ser avaliado individualmente. Alguns dos muitos fatores que influenciam a eficiência e o rendimento de energia, sob uma variedade de condições de vento, são o número, a forma e o tamanho das pás; o passo, ou ângulo das pás; a velocidade de partida (*'cut in'*) e de parada (*'cut off'*) da máquina; e o tipo de freio para proteger a máquina em ventos fortes (KOVARIK, 1979).

2.3.2 - Coeficiente de Torque

$$C_T = \frac{C_P}{\lambda} \quad (3)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A V^2 R} \quad (4)$$

onde

T - torque produzido pela turbina

λ - relação de velocidade na ponta

O C_T pode ser estimado empiricamente em função da relação de velocidade de projeto (λ_0).

$$C_{q \text{ partida}} = \frac{0.5}{\lambda_0^2} \quad (5)$$

onde

λ_0 – relação de velocidade de projeto

2.3.3 - Relação de velocidade na ponta (λ)

De um modo geral, o desempenho é analisado por meio da chamada Análise de Rankine que incluem hipóteses como:

(a) Admite-se que a turbina eólica afeta apenas o ar contido dentro do tubo de corrente (FIGURA 2.2) ;

(b) A energia cinética produzida como vórtice atrás da turbina não é considerada;

(c) Qualquer gradiente de pressão é ignorado.

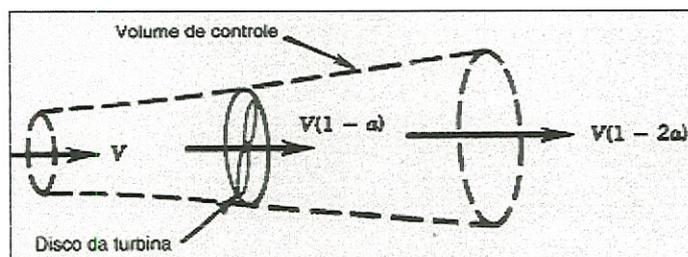


FIGURA 2.2 - Ilustração de um tubo de corrente.
FOX e McDONALD (1995)

À medida que aumenta a relação de velocidade na ponta das pás, a eficiência ideal aumenta, aproximando-se do valor de pico ($\eta = 0.593$), que, conforme citado anteriormente, é chamado de Limite de Betz. (Fisicamente, o redemoinho deixado na esteira é reduzido à medida que a relação na ponta das pás aumenta).

É necessário aumentar a relação de velocidades na ponta das pás para atingir uma faixa de operação mais favorável. Os projetos modernos de turbinas eólicas de alta velocidade são aerofólios cuidadosamente conformados e operam à relação de velocidade na ponta das pás de até 7.

2.3.4 - Velocidade de rotação

Para GOLDING (1976), a combinação de duas velocidades resultam numa velocidade de vento relativa, V_R , fazendo um ângulo de ataque, α , com a superfície, produzindo forças de sustentação (L) e arrasto (D)

perpendicular e paralela, respectivamente, à direção de V_R . A velocidade do vento relativa tem, na verdade, uma terceira componente - o movimento do ar local associado às forças aerodinâmicas sobre as pás (FIGURA 2.3).

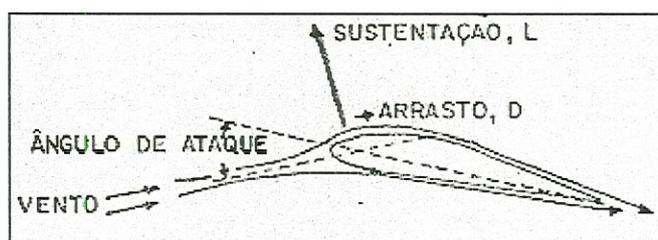


FIGURA 2.3 – Esforços atuantes na pá.
Núcleo de Energia (1986)

Com um rotor tipo propulsor (de 2 ou 3 pás), o total da superfície ativa da pá não está, certamente, movendo-se com a mesma velocidade. Para uma dada velocidade ω (rpm) do rotor, a velocidade, V (m/s), para uma seção elementar da pá num raio r é dada por $V = 2\pi R\omega$. Assim, para uma velocidade de vento, (V), uniformemente distribuída sobre a superfície do rotor, tanto a magnitude como a direção da velocidade de vento relativa variam com o raio r . Isso significa que a força de sustentação útil, (L), por unidade da superfície da pá, variará com r .

Os cálculos detalhados das forças sobre as pás estão baseados em seções elementares tratadas como partes de um aerofólio. A força de sustentação, (L), para uma dada velocidade de vento relativa, aumenta com o ângulo de ataque, (α), até que este atinge o valor da velocidade de estol do perfil, que deve ficar em torno de 15° , depois do qual a sustentação diminui. A informação sobre coeficientes de sustentação para aerofólios convencionais, tal como seria usado para pás de cata-vento, existe para possibilitar que estes cálculos sejam feitos e para que o coeficientes de perda na ponta sejam aplicados. No entanto, os dados de arrasto, que dependem muito do acabamento da superfície da pá, são motivos de incerteza.

Para alta eficiência, as seções da pá devem ser trabalhadas de modo a ter uma alta sustentação, com um mínimo de arrasto. Para extrair a potência ótima em cada seção ao longo (da pá), torna-se necessário que tanto sua forma, como o ângulo da pá que seu eixo principal faz com o plano de rotação, devam variar para adequar as mudanças de magnitude e direção do vento relativo. Quanto menor a velocidade periférica, ($2\pi r\omega$), maior o ângulo que, para uma dada velocidade de vento, o vento relativo fará com o plano de rotação. Segue-se, então, que para manter o melhor ângulo de ataque, o ângulo da pá deve variar continuamente ao longo dela e deve ser maior na raiz e na ponta.

As implicações, por isso, são que as pás podem ter tanto torção como conicidade e, de fato, as porções próximas ao cubo da pá, contribuem muito pouco para a potência extraída pela turbina. O custo mais alto de construção das pás quando comparado com as pás de forma plana retangular mais barata, sem torção, deve ser considerado em relação ao ganho possível de energia anual que resultaria de seu uso. O ângulo das pás para uma eficiência ótima, pode apenas ser calculado ao supor que a relação $2\pi R\omega/V$, e assim o ângulo de ataque, permanece constante; isto não pode ser, então, se ω for constante enquanto a velocidade do vento variar.

Assim, à medida que V aumenta, o ângulo de ataque, (α), aumentará e conseqüentemente, a força de sustentação, até o ângulo de estol ser atingido, depois do qual cairá ligeiramente. O coeficiente de potência do rotor, então, varia com a relação entre a velocidade de rotação e a velocidade do vento, sendo mais convenientemente expresso, para um dado projeto da pá, em função da relação de velocidade na ponta, $\lambda = 2\pi R\omega/V$, (sendo V a velocidade do vento não perturbado).

A FIGURA 2.1 apresenta as curvas de C_p para diferentes pás usadas em rotores de alta e baixa velocidade. Estas curvas exibem valores ótimos de λ que, como pode ser visto, variam de 1 para rotores multipás de

baixa velocidade até 6 ou mais, para rotores de alta velocidade. Se, portanto, a velocidade de rotação do rotor puder ser mantida proporcional a velocidade do vento, o rendimento ótimo é obtido. Isso é impossível de se atingir na prática, pois, primeiro, a inércia do rotor é alta, e segundo, a velocidade do vento varia na área varrida.

Uma outra diferença entre as forças que atuam num rotor multipás, quando comparadas com uma superfície simples vem da interferência entre as pás. Assim, cada pá move-se no fluxo de ar que foi perturbado por seu predecessor, e este fato influi no número e na largura das pás a serem usadas, na velocidade na qual elas girarem.

Para uma extração máxima de potência o retardamento do vento pelo rotor deve ser tal que a relação de velocidade à montante/jusante $=1/3$. Enquanto, na prática, não é possível produzir este retardamento em todo o vento, passando pelo rotor, o projeto deve seguir. Em relação a distância entre as pás, o rotor pode ser construído para extrair potência de todo o vento passando por ele. Isto pode ser feito ao usar pás muito largas girando lentamente ou apenas 2 ou 3 pás finas girando rapidamente (GOLDING,1976).

2.3.5 - Eficiência e Rendimento

Segundo SERRA e SCHOOOR (1995), a maior deficiência das turbinas eólicas é que sua eficiência depende da natureza estocástica das condições atmosféricas. Isto em conjunto com o fato de que, a maioria das turbinas são projetadas para condições típicas de vento predominante na área, onde elas são utilizadas, significa que elas operam bem abaixo da eficiência máxima na maior parte da sua vida útil. Com as pás fixas a eficiência máxima pode ser atingida numa faixa limitada de velocidade de vento, e os sistemas de

passo variável em geral são caros, relutando assim o uso em grande escala de geradores eólicos.

O rendimento (definido como a relação entre a potência que na realidade se obtém, e o máximo teórico que se obtém de uma certa velocidade) depende muito do tipo de hélice que se utiliza (STONER, 1971).

Considerando que D é o arrasto da turbina eólica numa velocidade V e P é a potência liberada pela turbina nessa velocidade, a eficiência é dada por

$$\eta = \frac{P}{VD} \quad (6)$$

onde VD é o trabalho realizado e P é a potência útil obtida da turbina (DURAND, 1921).

2.4 - A extração de energia

A energia cinética do ar em movimento (vento), por unidade de volume é:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (7)$$

onde:

ρ - densidade do ar

V - velocidade vento

A energia do vento é a quantidade de energia cinética que chega a cada segundo. Se a turbina for de eixo horizontal, então as pás, varrendo um disco de raio R gera:

$$P = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V^3 \quad (8)$$

de potência no cilindro de vento que atravessa a área do disco varrida pelas pás da turbina a cada segundo.

Nem toda esta potência pode ser extraída do vento pela turbina. Se pudesse, o vento na lateral à jusante teria velocidade zero e o vento seria carregado, bloqueando o fluxo. Assim, o vento na lateral à jusante tem velocidade mais baixa do que o vento na lateral à montante; pode-se ver que a extração máxima teórica de potência ocorre quando

$$V_{saída} = \frac{1}{3} V \text{ (condição ótima para extração máxima de potência)} \quad (9)$$

Sob esta condição ótima, a potência máxima que pode ser extraída é:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V^3 \quad (10)$$

ou 59,3% da potência original do vento.

Uma turbina eólica extrairá menos de 59,3% (Limite de Betz) da potência do vento, considerando um caso real. A eficiência do caso real depende de seu projeto e da velocidade do vento. O desempenho pode ser

otimizado apenas para uma dada velocidade em particular e a eficiência será então reduzida quando a velocidade do vento for maior ou menor do que esta.

A porcentagem real da potência removida do ar é freqüentemente especificada em função do coeficiente de potência. Há uma certa ambigüidade na literatura em relação à definição do coeficiente de potência. Assim, de acordo com esta definição

$$C_p = \frac{P_{real}}{P_{max}} \quad (11)$$

Segundo MERRIAN (1974), uma definição alternativa pode ser parcialmente estabelecida. De acordo com esta definição,

$$C_p = \frac{P_{real}}{\rho R^2 V^3} \quad (12)$$

Observa-se que a primeira definição resulta em $C_p=1$ para uma máquina ideal, embora a segunda definição resulte em $16\pi/54$, que é 0.93.

C_p é uma função tanto da configuração geométrica como da relação de velocidade da ponta. A relação de velocidades da ponta (λ) é a relação entre a velocidade de rotação na ponta e a velocidade do vento

$$\lambda = \frac{2\pi R \omega}{V} \quad (13)$$

onde ω é a velocidade de rotação. Uma turbina pode ser projetada para uma dada λ e uma dada velocidade do vento. Muitas turbinas antigas foram projetadas para uma velocidade de rotação constante, ω . Neste caso, λ varia inversamente com V . A perspectiva de se projetar uma máquina eólica para funcionar assincronicamente, variando a velocidade de rotação à medida que

varia a velocidade do vento, mantendo uma ótima relação de velocidade da ponta, é um desenvolvimento de grande importância.

Com certeza, o coeficiente de potência não é o único critério quando da escolha do tipo de turbina. Por exemplo, o tipo múltipás Americano é muito usado para pequenos bombeamentos de água, com segurança barata e bomba de êmbolo ineficiente. Alto torque de partida é necessário com este tipo de bomba.

A principal consideração em qualquer cata-vento é a estabilidade do suporte da torre. Quanto maior a área interceptada do vento, mais eficiente é a máquina quanto à extração de energia do vento, e maior é a força da ponta da pá sobre a torre. O empuxo axial numa turbina eólica de eixo horizontal é dado por:

$$F=2\pi R^2 \rho V^2 a(1-a) \quad (14)$$

onde a é um coeficiente relacionado entre a velocidade de saída do vento e a velocidade do vento que chega ao disco. É também chamado de fator de interferência axial.

$$\frac{V_{saída}}{V} = (1 - 2a) \quad (15)$$

É importante ter uma máquina eólica tão alta no vento quanto possível economicamente. Por causa do atrito do chão, a velocidade do vento aumenta com a altura.

Existem várias fórmulas semi-empíricas para a dependência da altura da velocidade do vento sobre uma placa plana. Uma dessas é

$$V_h=V_{10}(0.234+0.654\log_{10}[h+4.75]) \quad (16)$$

onde V_h é a velocidade na altura h em metros e V_{10} é aquela medida a 10 metros de altura.

A velocidade do vento em qualquer local não sendo constante, a turbina eólica deve ser escolhida com o conhecimento do espectro de velocidade em mente. Em parte, a escolha depende da aplicação pretendida e da armazenagem ou outras fontes de energia disponível. Os melhores locais são aqueles que: (1) são localizados próximos onde tem a potência necessária e (2) tem um bom vento.

Para quantificar este segundo critério é necessário conhecer algo sobre as características de projeto de uma turbina eólica em particular, que será montada no dado local. As mais importantes características de projeto são a curva $C_p \lambda$ e as três velocidades críticas, velocidade de partida, velocidade média e velocidade para parada. Abaixo da velocidade, nenhuma potência é gerada. Na velocidade média e acima desta a potência máxima é gerada; o rendimento de potência não aumenta com a velocidade do vento acima da velocidade média. A velocidade do vento é a velocidade na qual a média elétrica do gerador é alcançada. Se a turbina eólica fosse forçada a extrair mais energia do vento, o gerador seria submetido a uma sobrecarga, danificando-o. Acima da velocidade máxima para parada, a turbina não gera nenhuma energia - a idéia é, então, apenas prevenir a destruição durante as tempestades.

2.5 – Aerodinâmica aplicada à turbinas eólicas

2.5.1 - Aerodinâmica básica

Quando um corpo qualquer é colocado num escoamento uniforme, uma força aerodinâmica é exercida. Como a sua direção de um modo geral não é paralela à direção do escoamento não perturbado, essa força pode então ser decomposta em:

Força de sustentação L : componente perpendicular à direção do escoamento não perturbado;

Força de arrasto D : componente na direção do escoamento não perturbado.

Essas forças são mostradas para um aerofólio conforme mostra a Figura a seguir:

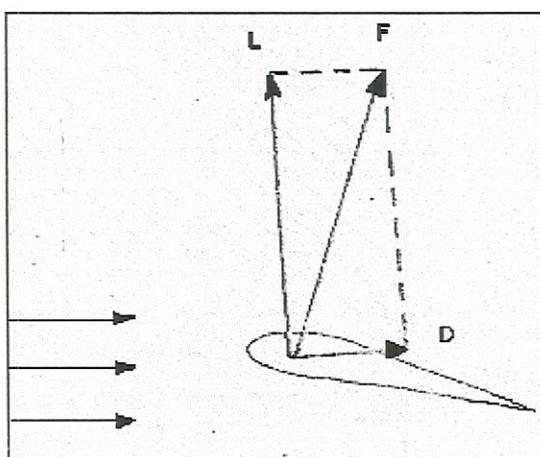


FIGURA 2.4 - Forças aerodinâmicas sobre um aerofólio.
Núcleo de Energia (1986)

Fisicamente, a força sobre um corpo (tal como um aerofólio) é causada principalmente pelas mudanças nas velocidades do escoamento em torno do aerofólio. No lado superior do aerofólio (FIGURA 2.4) as velocidades são maiores que no lado inferior. O resultado disso é que a pressão no lado superior é menor que a pressão no lado inferior, provocando a criação da força F .

A descrição das propriedades da sustentação e do arrasto de aerofólios diferentes, é como fazer-se referência a coeficientes adimensionais de sustentação e arrasto, que são definidos a seguir:

- **Coefficiente de sustentação:**

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (17)$$

- **Coefficiente de arrasto:**

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (18)$$

onde:

L – Força de Sustentação (N)

D – Força de Arrasto (N)

ρ - densidade do ar [kg/m^3];

V - velocidade do vento não perturbado [m/s];

S - área projetada da pá (corda \times comprimento) [m^2].

Esses coeficientes adimensionais de sustentação e arrasto são medidos em túneis de vento para uma faixa de ângulos de ataque, α . Esse é o ângulo entre a direção da velocidade do vento não perturbado e uma linha de referência do aerofólio. Para uma placa curvada, a linha de referência é simplesmente a linha que une os bordos de ataque e de fuga, enquanto para um aerofólio é a linha que liga o bordo de fuga com o centro de menor raio de curvatura no bordo de ataque (FIGURA 2.4).

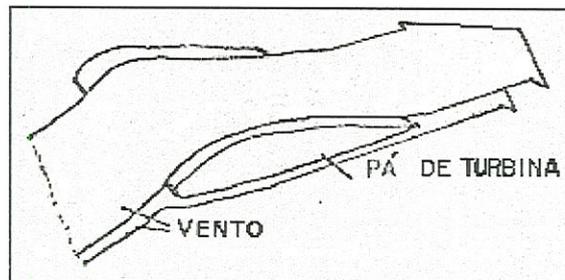


FIGURA 2.5 - Escoamento em torno da pá de uma turbina eólica.
Núcleo de Energia (1986)

Nota-se, na curva de $C_l \times \alpha$, existente na literatura, que o coeficiente de sustentação aumenta com o ângulo de ataque até um valor máximo de C_l (valor esse que corresponde ao ponto de estol), além do qual a curva é descendente, sendo interrompida logo adiante. Essa interrupção representa a condição de estol do escoamento, ou seja, a condição de descolamento da “camada limite” (região próxima ao corpo onde os efeitos da viscosidade são mais intensos) que provoca grande alteração do campo de velocidades e de pressões e, conseqüentemente, a perda de sustentação (FIGURA 2.6).

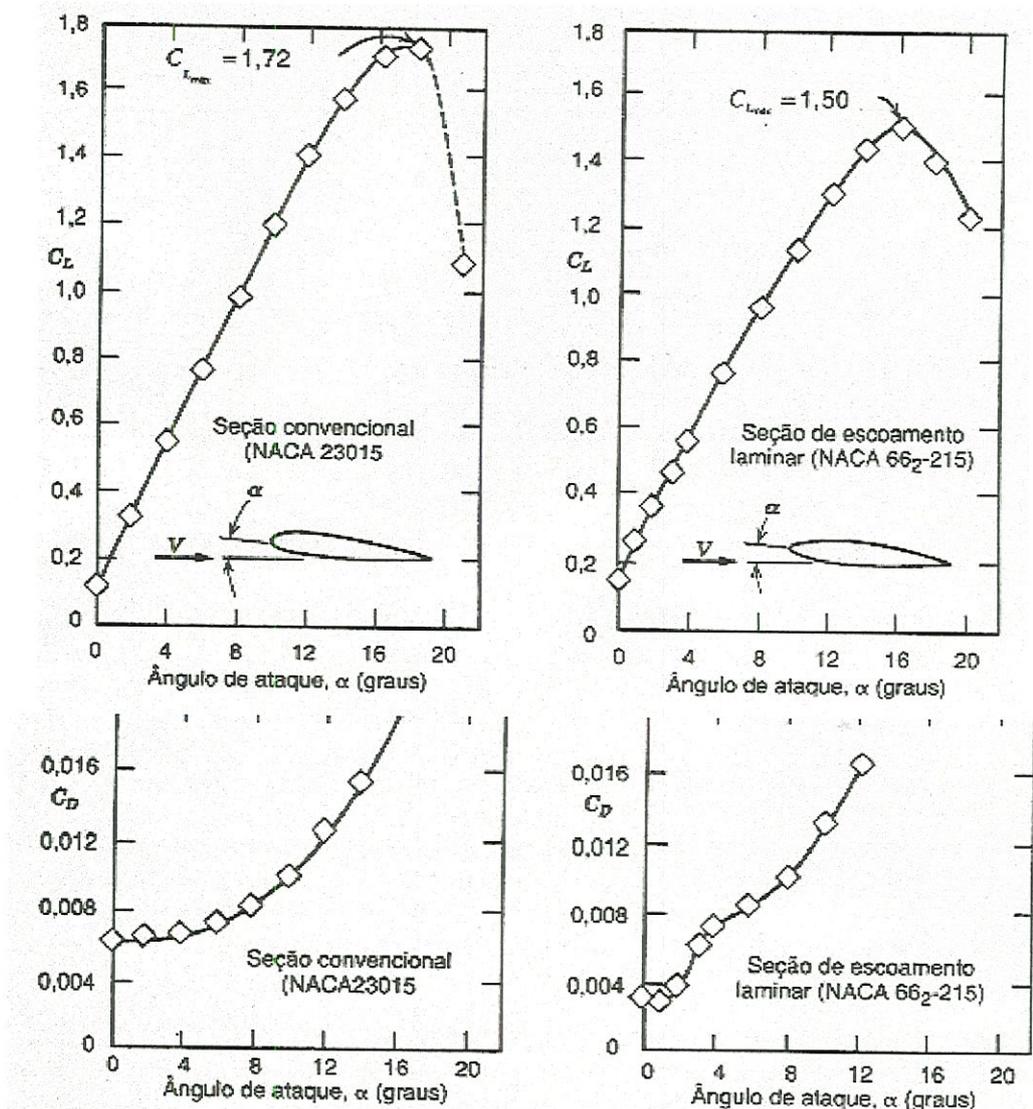


FIGURA 2.6 – Curvas $C_L \times \alpha$ e $C_D \times \alpha$ típicas para dois aerofólios convencionais. FOX e McDONALD (1995)

A tangente à curva $C_L \times C_D$ traçada a partir da origem indica o ângulo de ataque com a razão mínima de C_D/C_L . Essa razão determina fortemente os coeficientes máximos de potência que podem ser atingidos pelas turbinas eólicas.

Os valores de α e C_L para a razão mínima de C_D/C_L são parâmetros importantes no processo de projeto. Os valores para alguns aerofólios são dados na tabela abaixo.

TABELA 2.1 - Valores típicos da razão arrasto-sustentação, C_d/C_l e de α e C_l para alguns aerofólios. A curvatura dos perfis de placa curvada é definida como a razão entre a sua espessura projetada e sua corda.

	C_d/C_l	α	C_l
Placa plana	0.1	5°	0.8
Placa curva (curvatura de 10%)	0.02	3°	1.25
Placa curvada com tubo do lado côncavo	0.03	4°	1.1
Placa curvada com tubo do lado convexo	0.2	14°	1.25
Aerofólio NACA 4412	0.01	4°	0.8

fonte: Núcleo de Energia (1986).

2.5.2 – Teorias aplicadas

O estudo aerodinâmico aplicado às turbinas eólicas se dá por meio do uso de teorias baseadas em conceitos, como é o caso da Teoria do *Momentum* e da Teoria do Elemento da pá.

2.5.2.1 - Teoria da turbina Eólica Simples

O modelo mais simples baseia-se na Teoria do *Momentum*, desenvolvida há um século atrás para prever a eficiência dos propulsores de navio. A adaptação desta teoria às turbinas eólicas foi feita por BILAU (1925) e BETZ (1927), sendo a turbina representada por um disco atuador uniforme que cria uma descontinuidade de pressão no tubo de corrente de ar fluindo ao redor dele. Uma representação simples, mostrando o volume de controle total, está apresentada abaixo.

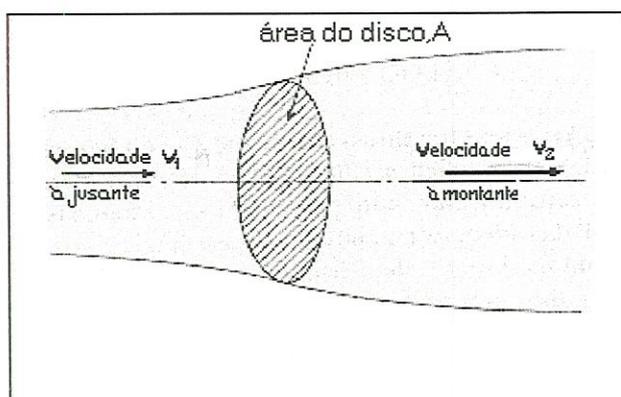


FIGURA 2.7 – Representação de um tubo de corrente do fluxo numa turbina eólica de eixo horizontal.

Nos modelos mais simples, que possibilitam que a Mecânica Newtoniana seja aplicada, o fluxo é considerado permanente e axial, o ar é considerado incompressível e invíscido e o fluxo a montante é considerado constante sobre esta seção do tubo de corrente sem nenhuma descontinuidade de pressão ao longo do contorno do tubo de corrente. A aplicação das relações de momento e energia mostra que a velocidade axial média efetiva no disco (FIGURA 2.7), V_D , é dada por:

$$V_D = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (19)$$

onde

V - velocidade à jusante

V_1 - velocidade à jusante

isto é, igual ao retardamento do fluxo que é imposto à jusante e à montante do disco.

O ganho de energia do disco P pode ser expresso como taxa (relação) de extração de energia cinética deste fluxo, ou seja,



$$P = \frac{1}{2} \rho A V_D (V^2 - V_2^2) \quad (20)$$

onde $\rho A V$ é a taxa de fluxo de massa através do disco (sendo ρ a densidade do ar e A a área varrida pelo disco atuador).

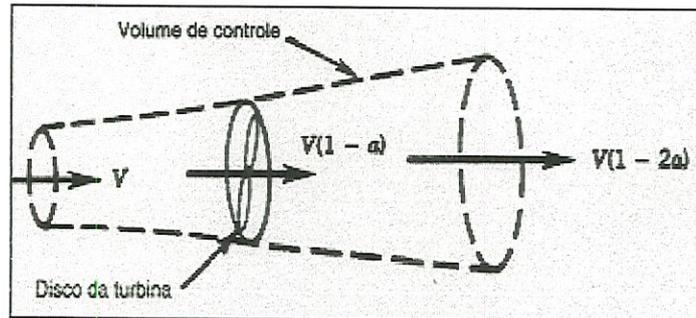


FIGURA 2.8 – Volume de controle e notação simplificados, utilizados para analisar o desempenho de uma turbina eólica de eixo horizontal FOX and McDONALD

É conveniente descrever a retardação no fluxo (FIGURA 2.8) usando um fator de interferência axial a , tal que

$$V_D = V(1-a) \quad (21)$$

e assim

$$V_2 = V(1-2a) \quad (22)$$

Substituindo V e V_2 das Equações (21) e (22) na Equação (19) de modo que a energia seja expressa em termos da velocidade a jusante, V_1 , a energia é dada por

$$P = \frac{1}{2} [4a(1-a)^2] \rho A V^3 \quad (23)$$

Os termos são agrupados desta forma porque o termo $4a(1-a)^2$ é o coeficiente de potência, C_p . Esta é a relação da potência real liberada pelo disco para a potência da corrente livre fluindo através de uma área, (A), semelhante, mas não interrompida, como mencionado anteriormente. Se o fator de interferência axial, (a), for 0 então C_p é 0 e nenhuma potência é desenvolvida; se a é 0.5, a velocidade a montante, (V_2), é 0, representando o caso impraticável de um tubo de corrente infinitamente expandido. A extração de potência máxima de acordo com esta teoria simples ocorre quando a é 1/3 é

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V^3 \quad (24)$$

Analogamente o empuxo axial T sobre o disco é dado por

$$T = \frac{1}{2} [4a(1-a)] \rho A V^2 \quad (25)$$

$4a(1-a)$ é conhecido como coeficiente de empuxo ou torque, C_T . C_T assume o valor máximo quando a é 0.5 e a velocidade a montante é 0; para o ganho máximo de energia (quando a é 1/3) C_T ainda tem 8/9 de seu valor máximo.

A combinação das várias perdas que são ignoradas nesta teoria reduz o coeficiente de potência máximo obtido na prática para valores medidos pretendidos de 0.46 a 0.47.

2.5.3 – A superfície rugosa

Aerodinamicamente, a superfície rugosa causa mudanças significativas no estado da camada limite, sendo a questão de como o processo de transição depende da rugosidade de grande importância.

De acordo com SCHLICHTING (1979), a presença da rugosidade favorece a transição no sentido de que em outras condições idênticas a transição ocorre em número de Reynolds mais baixos numa parede rugosa do que numa parede lisa. Isto segue da teoria da estabilidade: a existência de elementos rugosos eleva as perturbações na corrente laminar que são somados aqueles gerados pela turbulência e ainda presentes na camada limite. Se as perturbações criadas pela rugosidade forem maiores do que aquelas devido a turbulência, deve-se esperar que um grau inferior de amplificação seja suficiente para afetar a transição. Por outro lado, se os elementos de rugosidade forem muito pequenos, as perturbações resultantes ficam abaixo do “*threshold*”, que é característico daqueles gerados pela turbulência da corrente livre. Neste caso, a presença da rugosidade não teria nenhum efeito sobre a transição. Assim, na discussão da influência da rugosidade sobre a transição é necessário obter respostas para as seguintes questões:

1. Qual é a altura máxima dos elementos de rugosidade abaixo do qual não existe nenhuma transição ?
2. Qual é a altura limitante (maior) do elemento de rugosidade que leva a transição a ocorrer no próprio elemento?
3. Como é possível descrever a posição do ponto de transição na faixa intermediária entre esses dois limites?

2.5.3.1 – *Rugosidade Admissível*

A quantidade de rugosidade que é considerada admissível nas aplicações na engenharia é aquela em que, na altura máxima dos elementos de rugosidade individual, não causa nenhuma aumento de arrasto, quando

comparado à superfície lisa. A importância prática de determinar a quantidade de rugosidade admissível, para uma dada circunstância, é muito grande.

De acordo com a equação abaixo, a altura admissível do elemento de rugosidade (k_{adm}) não depende do comprimento do corpo. Ela é determinada apenas pela velocidade e pela viscosidade cinemática,

$$\frac{U_{\infty} \times k_{adm}}{\nu} = 100 \quad (26)$$

onde

U_{∞} - velocidade do fluxo livre

ν - viscosidade cinemática

De acordo com a condição,

$$k_{adm} \leq 100 \times \frac{\nu}{U_{\infty}} \quad (27)$$

Daí segue-se que os valores absolutos da rugosidade admissível para um modelo e um caso real correspondente são os mesmos em ambos os casos. Para grandes corpos isso pode levar à rugosidades admissíveis extremamente pequenas, quando comparadas com suas dimensões lineares.

Para aplicações práticas ainda é mais conveniente relacionar o valor admissível da rugosidade diretamente com o comprimento da placa, (1), ou mais genericamente, ao comprimento do corpo em consideração (por exemplo, corda da pá de turbinas eólicas). Assim:

$$k_{adm} = l \times \frac{100}{R_l} \quad (28)$$

onde

$$R_l = \frac{U_\infty \times l}{\nu} \quad (29)$$

R_l - número de Reynolds considerando o comprimento, l .

2.5.3.2 – Rugosidade Crítica

A altura de uma protuberância que causa transição na camada limite laminar é chamada altura crítica ou rugosidade crítica. A rugosidade afeta a resistência oferecida pela parede ao mover o ponto de transição na direção a montante e, dependendo da forma do corpo, o arrasto do corpo é predominantemente devido ao atrito de superfície (por exemplo, um aerofólio).

O aumento da rugosidade no arrasto de forma pode ser resumido como segue: corpos com bordos pronunciados (cantos vivos), como por exemplo uma placa plana com ângulos retos à corrente, tem baixa sensibilidade à rugosidade da superfície, porque o ponto de transição é determinado pelos bordos. Por outro lado, o arrasto de corpos reforçados (“*bluf*”), tais como cilindros circulares, é muito sensível à rugosidade. O valor do número de Reynolds crítico para o qual o arrasto apresenta uma queda rápida de depende do grau acentuado da rugosidade da superfície. Como mostra a FIGURA 2.10, o número de Reynolds crítico diminui com o aumento da rugosidade relativa k/R ($d=2R$ =diâmetro do cilindro). A camada limite parece ser perturbada pela rugosidade de tal forma que a transição ocorre em números de Reynolds consideravelmente mais baixos do que com cilindros lisos. A rugosidade tem, assim, o mesmo efeito conforme PRANDTL’S TRIPPING WIRE, que reduz o arrasto numa determinada faixa de número de Reynolds.

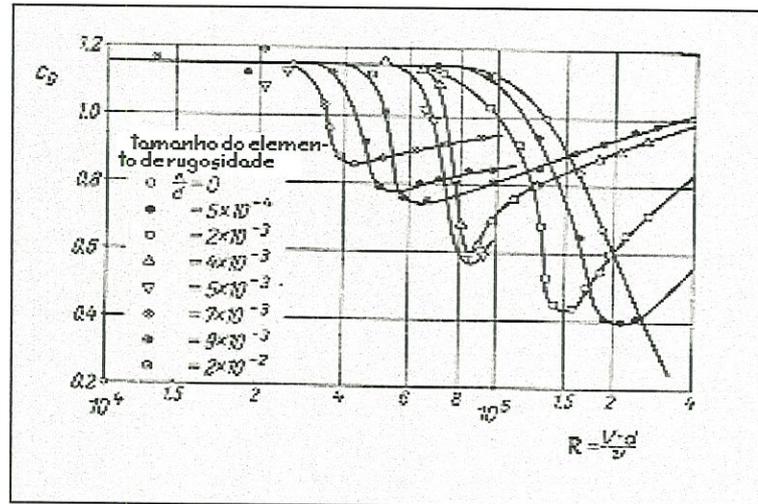


FIGURA 2.9 - Arrasto sobre cilindros circulares com rugosidade variada (SCHLICHTING,1979)

A altura da rugosidade crítica pode ser definida como a altura abaixo da qual o arrasto não aumenta. Se o tamanho de grão dos elementos de rugosidade estiver abaixo desse valor, então a superfície é definida como aerodinamicamente uniforme.

Conforme apresentado por SCHLICHTING (1979), a altura permissível do grão pode ser dada por:

$$\frac{k}{c} \leq \frac{100}{R_{ec}} \quad (30)$$

onde

R_{ec} – número de Reynolds na corda considerada

Segundo (DAVIDSON,1985), esta aproximação também pode ser aplicada para perfis de espessura finita.

A rugosidade necessária para provocar a transição na estação da rugosidade também é dada por:

$$\frac{k}{c} > \frac{900}{R_{ec}} \quad (31)$$

2.5.3.3 – Rugosidade Padrão

Em muitas aplicações práticas a densidade de rugosidade das paredes é consideravelmente pequena e não pode ser descrita pela altura de protusão, (k), ou pela medida relativa de k/R , apenas. É conveniente arranjar tal rugosidade numa escala de “rugosidade padrão” e adotar a rugosidade de areia **Nikuradse** para correlação, porque foi investigada numa ampla faixa de valores de Reynolds e k_s/R . É conveniente correlacionar qualquer rugosidade dada com sua “rugosidade de areia correspondente” e defini-la como aquele valor que dá o coeficiente de resistência (SCHLICHTING,1979).

2.5.4 – Métodos de Visualização de Fluxo

Os métodos de visualização de fluxo são importantes não apenas para apresentar uma visão qualitativa clara do fenômeno do fluxo, mas, também, em muitos casos, para produzir informação quantitativa. De um modo geral, os métodos dependem do reflexo ou dispersão de luz por pequenas partículas líquidas ou sólidas introduzidas na corrente, ou nas mudanças naturais do índice refrativo com o acompanhamento das mudanças de densidade do fluxo compressível, ou na refração de luz por filamentos ou partículas de fluido de diferente índice refrativo introduzido no fluxo. Existe uma série de métodos para indicação da posição da transição de fluxo laminar para turbulento na camada limite do corpo, por exemplo o método de sublimação.

2.5.4.1 – *Curso da partícula*

Na prática, o movimento da partícula de fluido pode ser visualizada por vários métodos. Por exemplo, quando partículas de sólido ou líquido são introduzidas no fluido, ou existindo naturalmente partículas de pó e outro sólido qualquer no fluido, elas podem ser observadas por meio de iluminação adequada. Alternativamente, jatos de fumaça podem ser introduzidos, ‘hot-spots’ (salpicos) podem ser produzidos.

2.5.4.2 – *Princípios físicos envolvidos na visualização do movimento fluido*

No primeiro grupo de métodos de visualização do movimento fluido, pequenas partículas de sólido ou líquido são introduzidos na corrente de ar e observadas pela luz refletida ou espalhada. É necessário supor que tais partículas são de inércia suficientemente pequena para seguir a direção local do movimento fluido, e suficientemente leves para não serem sensivelmente influenciadas pela gravidade. Exemplos típicos desses métodos são o uso de filamentos de fumaça e a técnica ultra microscópica.

Um método análogo de visualização depende do uso de fios finos de seda ou algodão, para indicar a direção e estabilidade do fluxo próximos aos seus pontos de fixação. Esse método comumente chamado de técnica “*wool tuft*” (tufos de lã) é útil, particularmente, na visualização do fluxo próximo à superfície do corpo.

O segundo grupo de métodos depende das mudanças do índice refrativo no fluxo fluido, observado por meio da luz transmitida. Para esta finalidade as correntes de gás transparente de diferente índice refrativo daquele do fluido de trabalho pode ser introduzido, ou um filamento do próprio fluido de trabalho pode ser aquecido continuamente por fio quente (“*hot wire*”) ou intermitentemente pela descarga de centelhas (“*spark*”). Este grupo inclui

métodos baseados nas mudanças no índice refrativo que acompanha as mudanças naturais na densidade do campo de fluxo.

Para observação do fluxo na camada limite é possível usar alguns dos métodos citados ou uma série de técnicas especiais, como:

- Técnica de Fumaça
- Técnica de ‘spark’(centelha)
- Método ‘China-clay
- Método Filme líquido
- Tufos (‘tufts’)

Entre as várias técnicas e métodos citados acima, destaca-se o Método ‘China-clay’, o qual será abordado a seguir, por ser análogo ao método de sublimação adotado neste trabalho.

2.5.4.3 – Método ‘China-clay’

A superfície do aerofólio é revestido, por sua vez, com todo o china-clay (caulim), um sólido cristalino de índice refrativo 1.56 com aparência branca, quando seco. O depósito de caulim é pulverizado com um líquido volátil de mesmo índice refrativo, aproximadamente, de modo que o depósito resultante torne-se sensivelmente transparente. O túnel é então ligado. Se a taxa de vaporização for maior na região turbulenta do que na região laminar da camada limite, o depósito branco de caulim aparece primeiro atrás do ponto de transição.

O caulim é melhor aplicado pela pulverização como uma suspensão em Frigilene ou algum líquido semelhante. Quando o Frigilene seca, o loca (goma-laca) pode ser apoiada (‘rubbed down’, colada) com lixa de esmeril ‘blue-back’ fina, para remover quaisquer irregularidades que possam

estar presentes. Como o tratamento das partículas de caulim são muito pequenas, não é normalmente encontrada nenhuma dificuldade para atingir uma superfície uniformemente lisa. O líquido volátil ou desenvolvedor pode ser escolhido de modo que a indicação é produzida num tempo razoável sob as condições de ensaios. Por outro lado, a indicação pode não ser tão rápida, ou os efeitos simulados falsos podem ocorrer por causa dos movimentos dos pontos de transição, durante o período no qual o túnel é ligado até começar a funcionar.

Após o uso, o depósito de caulim pode ser repulverizado com desenvolvedor na preparação para uso posterior (novos ensaios). O depósito de caulim permanece na superfície, por todas as séries inteiras de ensaios. Depois de algum tempo, porém, o depósito é removido das proximidades do bordo pela alta fricção ('skin friction) local e, se a transição for indicada aqui, o depósito pode ser substituído periodicamente (MERRIAN,1979). Neste trabalho foi usado o naftaleno como agente sublimado.

CAPÍTULO 3 - PROJETO DO MODELO DA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

Foi projetado e construído um modelo de turbina eólica de eixo horizontal com três pás (FIGURA 3.1), no Laboratório de Aeronaves, na Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. As características do modelo projetado estão descritas a seguir.

3.1 – Características do modelo

O modelo construído no Laboratório tem as seguintes características:

<u>Tipo de turbina</u>	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
Previsão de potência máxima:	100 W
Velocidade de projeto:	20 m/s

Rotor

Número de pás:	três
Material das pás:	fibra de vidro
Massa da pá:	200g (aproximadamente)
Diâmetro do rotor:	1.8 m
Perfis utilizados:	W1-xxx da FFA W1-271 W1-242 W1-211 W1-182 W1-152 W1-128
Corda:	variável (0.047-0.114m)
Torção:	nula
Comprimento da pá:	0.84m
Área da pá:	0.054m ²
Solidez:	2.2
Relação de conicidade da pá:	0
Relação de velocidade (na ponta do projeto):	2 - 6
Velocidade de rotação:	1000rpm
Número de Reynolds:	200.000
Passo da pá:	0 - 25°
Tipo de controle:	por passo (ajuste manual)

Torre

Altura:	1,4m
Tipo:	tubular
Diâmetro:	30mm
Espessura do tubo:	2mm

Túnel de vento

Tipo da seção de ensaio:	hexagonal
Área da seção de ensaio:	0.526 m ²
Comprimento da seção de ensaio:	1.6m
Área da seção de saída do fluxo:	4 m ²
Relação de contração:	6
Velocidade máxima do fluxo:	55 m/s

Balança

Tipo:	Aerodinâmica
Material	Alumínio
Número de extensômetros:	8
Número de graus de liberdade:	2

O túnel de vento, LAE-1, foi originalmente concebido pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) na antiga seção de Aeronáutica. As suas principais partes foram transferidas para o Laboratório de Aeronaves da Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. Foi então reprojetoado e reconstruído, e calibrado no LAE (Laboratório de Aeronaves), por CATALANO (1988). Foram utilizados a câmara de ensaio para os testes com a pá parada e a saída para o caso em rotação. A saída foi tratada para remover

os efeitos de rotação do ventilador do túnel através do emprego de uma colmeia e telas.

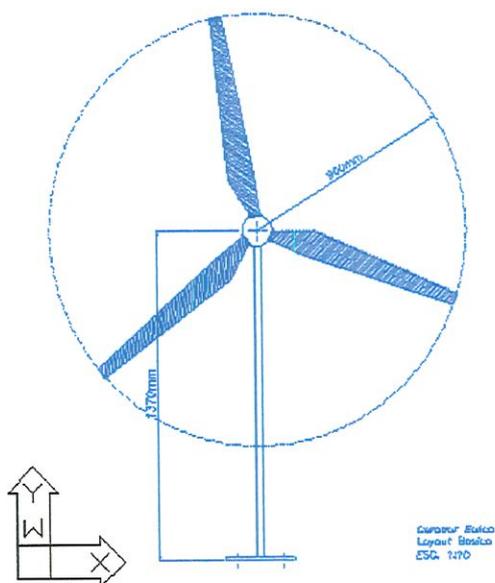


FIGURA 3.1 – Desenho do modelo

A seguir é apresentada numa tabela explicativa a distribuição dos aerofólios ao longo da pá. Esta tabela foi montada com algumas considerações adotadas no projeto.

TABELA 3.1 – Distribuição dos aerofólios na pá.

<i>Aerofólio W1-xxx</i>	<i>Estação (% do raioR)</i>	<i>Raio (m)</i>	<i>Corda (m)</i>
271	20	0.18	0.114
242	30	0.27	0.105
211	50	0.45	0.089
182	65	0.58	0.075
182	80	0.72	0.062
152	92.5	0.83	0.053
152	95	0.855	0.051
128	97.5	0.88	0.048
128	99	0.89	0.047

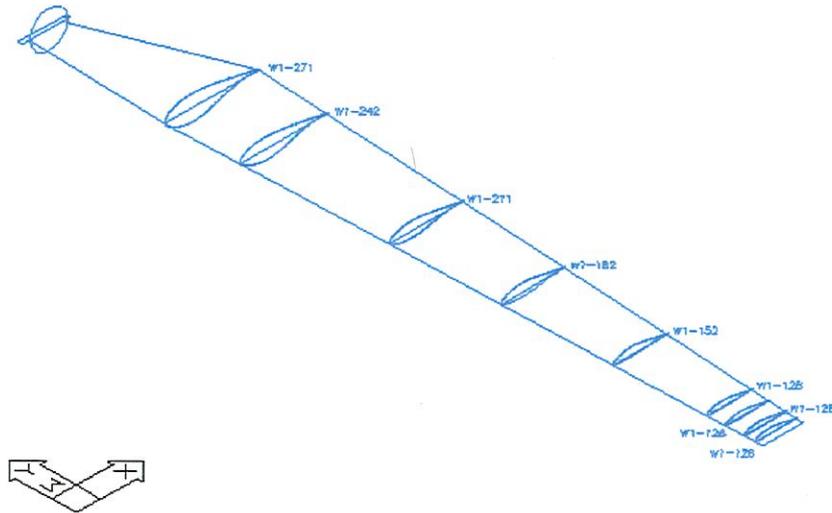


FIGURA 3.2 – Desenho tridimensional da pá do modelo

3.1.1.1 – Tipo de turbina

A turbina projetada e construída (FIGURA 3.3) foi do tipo eixo horizontal comumente utilizada para geração de energia elétrica. O modelo adotado está numa escala reduzida de aproximadamente 20:1. Esse tipo de turbina foi adotado por merecer um estudo em relação a sua aerodinâmica, que ainda se encontra em fase de pesquisa em todo o mundo.

3.1.1.1.1 - Perfis adotados

Os perfis adotados são específicos para o uso em energia eólica, ao contrário daqueles que comumente se usa (os da aviação). São aerofólios de espessura variada, de 27.1% a 12.8% da corda (FIGURA 3.2), distribuídos ao longo de nove estações da pá, conforme mostrado na TABELA 3.1. Os aerofólios mais espessos, W1-271, W1-242 e W1-211 aparecem até a metade da pá, depois da qual os aerofólios menos espessos, W1-182, W1-152 e W1-128 já são suficientes para garantir a sustentação adequada.

A informação encontrada na literatura específica, existente na área, mostra que estes aerofólios apresentaram um bom desempenho em altos números de Reynolds. Como o Número de Reynolds para a turbina projetada é baixo, o desempenho pode, de certa forma, ser considerado crítico, principalmente quanto ao arrasto gerado. No entanto, como estes perfis já foram analisados teoricamente, este projeto poderá fornecer informações importantes sobre a sua utilização, na condição de baixo Reynolds, aqui adotada.

A justificativa para utilização desses perfis, além de seu uso específico na área, é que estes apresentam boas características, quanto ao desempenho em fluxo laminar e em fluxo turbulento, e baixa sensibilidade à rugosidade. Esta verificação será feita através dos experimentos descritos no próximo item, deste Capítulo.

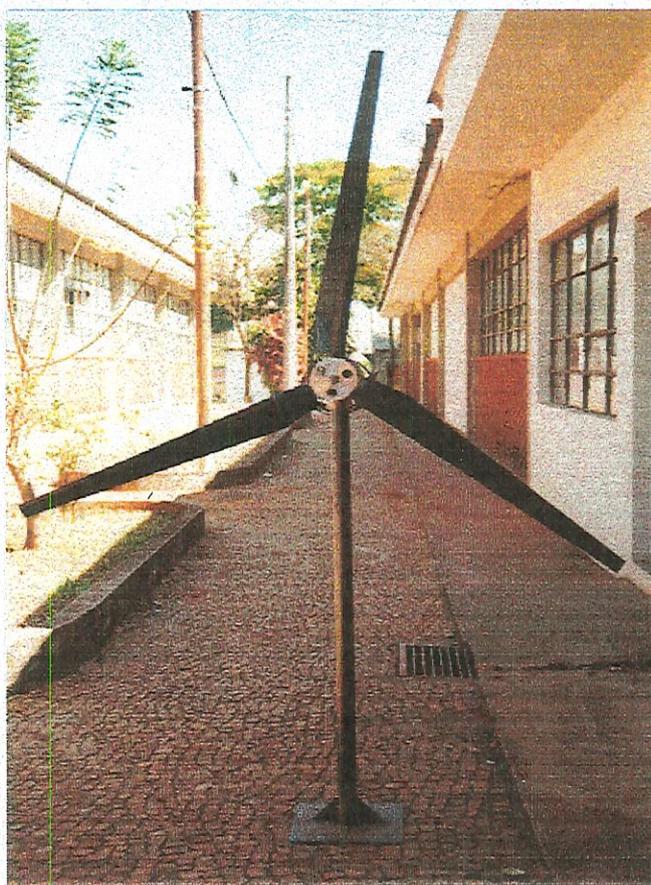


FIGURA 3.3 – Fotografia do modelo da turbina montado

3.1.1.2 – Rotor

O rotor adotado é de três pás, de baixa solidez. (FIGURA 3.3)

O cubo do rotor foi usinado em alumínio e o eixo em aço 1020. No cubo foram usinados três furos para encaixe das pás com a fixação de três parafusos tipo Allen, de modo a possibilitar a mudança de passo. No cubo foram feitos também três furos para alívio do peso.

As pás foram laminadas com manta de vidro e resina poliéster sobre um molde (FIGURA 3.4), previamente preparado também em fibra de vidro, e devidamente polido para facilitar a desmoldagem. Estas pás (FIGURA 3.5) foram laminadas em duas metades longitudinais e depois foram coladas com a própria resina. Após a fase de laminação, passou-se para a fase de lixamento, que se deu com lixas de diferentes rugosidades, até que se obteve uma superfície bem lisa e uniforme. Elas foram, então, pintadas. A cor preta foi escolhida para facilitar a visualização do escoamento no ensaio de visualização.

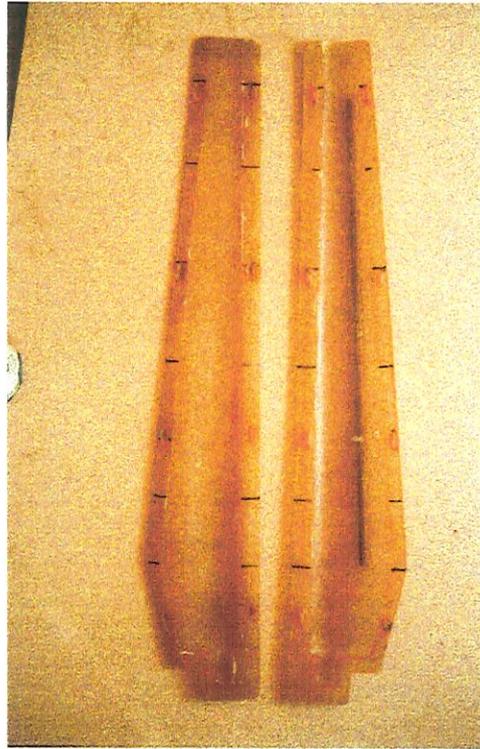


FIGURA 3.4 - Fotografia dos moldes utilizados para fabricação das pás.



FIGURA 3.5 - Imagem fotográfica das pás.

3.1.1.3 - Conjunto eixo-mancal

Para usinagem do eixo foi escolhido o aço 1020. O comprimento deste foi de 0.28m. Os mancais utilizados foram dois mancais de esferas, sendo um do tipo autocompensador, próximo ao cubo, para compensar possíveis desalinhamentos.

3.1.1.4 – Torquímetro

O transdutor de torque utilizado foi do tipo dinâmico, modelo JS105 – capacidade de 27N.m, cujo fabricante foi o JS Sistemas Mecânicos e Elétricos S.A.

3.1.1.5 - Gerador elétrico

Foi utilizado como gerador elétrico um dínamo automotivo.

3.1.2 – Montagem do modelo

O modelo consiste de um rotor de 3 pás montado sobre uma torre tubular, conforme apresentado na FIGURA 3.3.

3.1.2.1 - Conjunto Cinemático

O conjunto cinemático (FIGURA 3.6) consiste basicamente de:

Conjunto eixo-mancal
Cubo
Torquímetro
Gerador

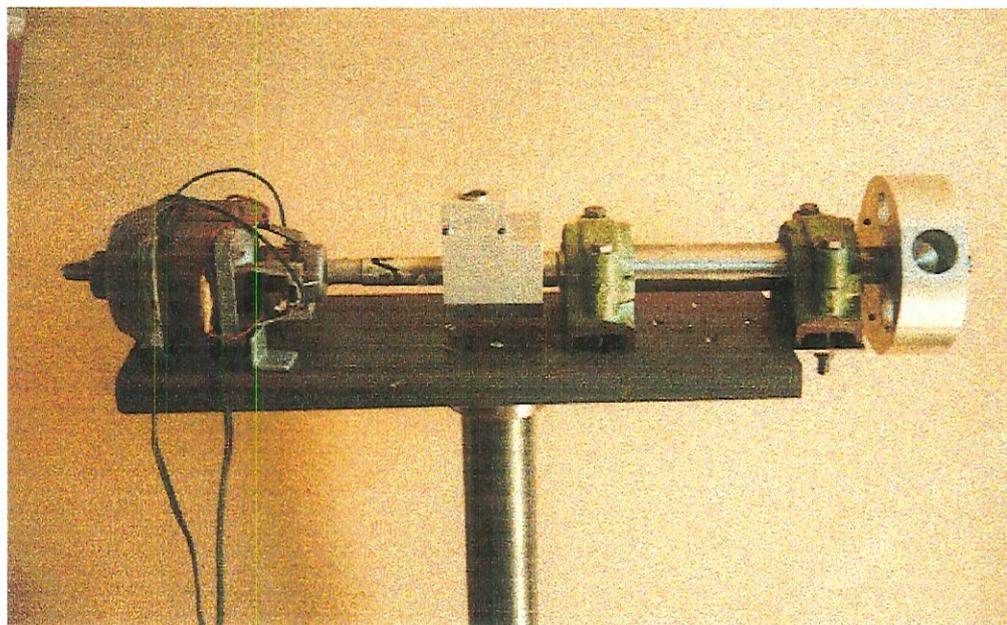


FIGURA 3.6 - Fotografia do conjunto cinemático

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA

Foi projetada, construída e montada uma turbina eólica de eixo horizontal de 1.8m de diâmetro, com a finalidade de realizar ensaios aerodinâmicos sobre as pás. Os parâmetros investigados foram o efeito da rugosidade sobre a transição da camada limite com conseqüente perda de potência e torque analisados adimensionalmente; e a visualização do escoamento sobre a pá para análise do perfil adotado. Os ensaios foram realizados em duas etapas descritas a seguir.

4.1 – Etapas dos ensaios

O estudo foi realizado com base em ensaios aerodinâmicos sobre pás e divididos basicamente em duas etapas:

- Ensaio com a pá parada dentro da câmara de ensaio do túnel;
- Ensaio com as pás da turbina girando.

4.2.1 – Ensaio com a pá parada

4.2.1.1 – Ensaio de Visualização do Escoamento

Foi realizado o ensaio de visualização sobre a pá parada dentro da câmara de ensaio no túnel de vento LAE-1. A velocidade do fluxo livre na seção de ensaio do túnel foi de aproximadamente 26m/s, para todos os ensaios.

O material utilizado para visualização foi uma mistura de naftaleno com um solvente (tricloroetano). Essa mistura foi pulverizada sobre toda a superfície da pá, tanto no intradorso como no extradorso. Após a sublimação da mistura sobre as superfícies devido ao efeito do fluxo sobre a pá, foram registradas imagens, possibilitando a visualização da região de ocorrência de transição.

Este ensaio foi realizado para ângulos de ataque, variando de 0 a 18 graus (com incrementos de 2 graus).

Conforme descrito na literatura, o ensaio de visualização pode apresentar resultados qualitativos, além dos resultados quantitativos que normalmente apresentam. Dessa forma, as imagens registradas foram transpostas em curvas a fim de fornecerem a posição (em percentual de corda x/c) da transição da camada limite laminar para a camada limite turbulenta, ao longo de todo o raio (r/R), em cada ângulo de ataque adotado.

4.2.1.2 – Ensaio com a Superfície da Pá Lisa, sem rugosidade

Este ensaio foi considerado o ponto de partida em relação ao ensaio de rugosidade, por servir como parâmetro de comparação entre a pá lisa e a pá rugosa, ou dizendo de outra forma, a pá limpa e a pá suja. No ensaio, as variáveis medidas foram a sustentação e o arrasto, as quais foram tomadas por

meio da utilização de uma balança aerodinâmica (ver ANEXO A). Essa balança, com a utilização de extensômetros, transmitia o sinal de L (sustentação) e D (arrasto) para um canal de leitura em milivolts, cujo registro foi feito através de um microcomputador, contendo uma placa de aquisição de dados.

Assim, inicialmente, o túnel de vento foi acionado e a velocidade foi mantida dentro de uma faixa de valores relativamente constantes (25m/s a 27m/s). Os valores das forças de sustentação (L) e arrasto (D) foram registrados para uma faixa de ângulos de ataque, ou seja, de 0 a 16 graus, para depois serem expressos de forma adimensional.

4.2.1.3 – Ensaio com a Superfície da Pá Rugosa

O ensaio de rugosidade foi realizado com a utilização de areia como material adotado, para simular a infestação de insetos e acúmulo de sujeira, que naturalmente ocorre na pá em condições atmosféricas normais.

Um parâmetro importante na utilização da areia foi a sua granulometria. Essa granulometria foi escolhida de acordo com o tipo de peneira utilizada, que obedecia ao número de furos por polegada quadrada. A Tabela abaixo mostra as características da peneira utilizada (SOLOTEST).

TABELA 4.1 – Características da Peneira Solotest – grãos de areia

USS	Abertura em mm	Tyler (mash)
18	1.000	16
25 (ABNT)	0.71	24
35	0.5	32
45 (ABNT)	0.35	42
60 (ABNT)	0.25	60
70	0.21	65
100	0.149	100

A rugosidade foi escolhida como aquela necessária para provocar a transição, de acordo com a literatura citada anteriormente, ou seja,

$$\frac{k}{c} > \frac{900}{Re y_c} \quad (36)$$

TABELA 4.2 – Valores da corda para as estações da ponta da pá

%Raio	CORDA[MM]
80	62
92.5	53
95	51
97.5	48
99	47

TABELA 4.3 – Tamanhos de grãos e faixa de aplicação adotados no ensaio de rugosidade da pá parada.

Faixa de aplicação da rugosidade em função da corda (%c)	Tamanho de grão adotado em [mm]		
0.04	0.149	-	-
0.08	0.149	-	-
0.12	0.149	-	-
0.16	0.149	-	-
0.20	0.149	-	-
0.24	0.149	0.21	0.25

De acordo com os dados apresentados na TABELA 4.3, a rugosidade adotada com grãos de areia (de 0.149mm, 0.21mm e 0.25mm) foi colocada na superfície da pá, ao longo de todo o raio (envergadura). A faixa de rugosidade foi adotada em função do comprimento da corda, ou seja, simulando um caso real, em que a rugosidade é incrustada na superfície da pá, ocorrendo, de um modo geral, no bordo de ataque de maneira intensa até aproximadamente a espessura máxima.

4.2.2 – Ensaio com as Pás do Rotor Girando

Analogamente à pá parada, foi realizado o ensaio visualização da transição nas pás do modelo girando utilizando o fluxo na saída do túnel de vento (velocidade do fluxo livre de 8 a 13m/s). Foi realizado, além do ensaio de visualização de escoamento, o ensaio do efeito da rugosidade, adotando os mesmos tamanhos de grãos ($k=0.149\text{mm}$ e $k=0.25\text{mm}$), quando da pá parada, conforme descrito na seção anterior.

Para este ensaio a saída do túnel de vento do Laboratório de Aeronaves, LAE-1, recebeu alguns cuidados técnicos quanto a uniformização de seu fluxo, uma vez que este apresenta um fluxo bastante turbulento e rotacional. Para tanto, foi colocada uma colmeia de chapas de madeira compensada mais uma tela na tentativa de uniformizar e direcionar o fluxo (APÊNDICE B).

Passou-se, então, para a etapa seguinte, que foi instalar o modelo próximo à saída do túnel. O modelo foi fixado no chão na parte de fora do túnel próximo ao ventilador, conforme mostra a FIGURA 4.1 a seguir.

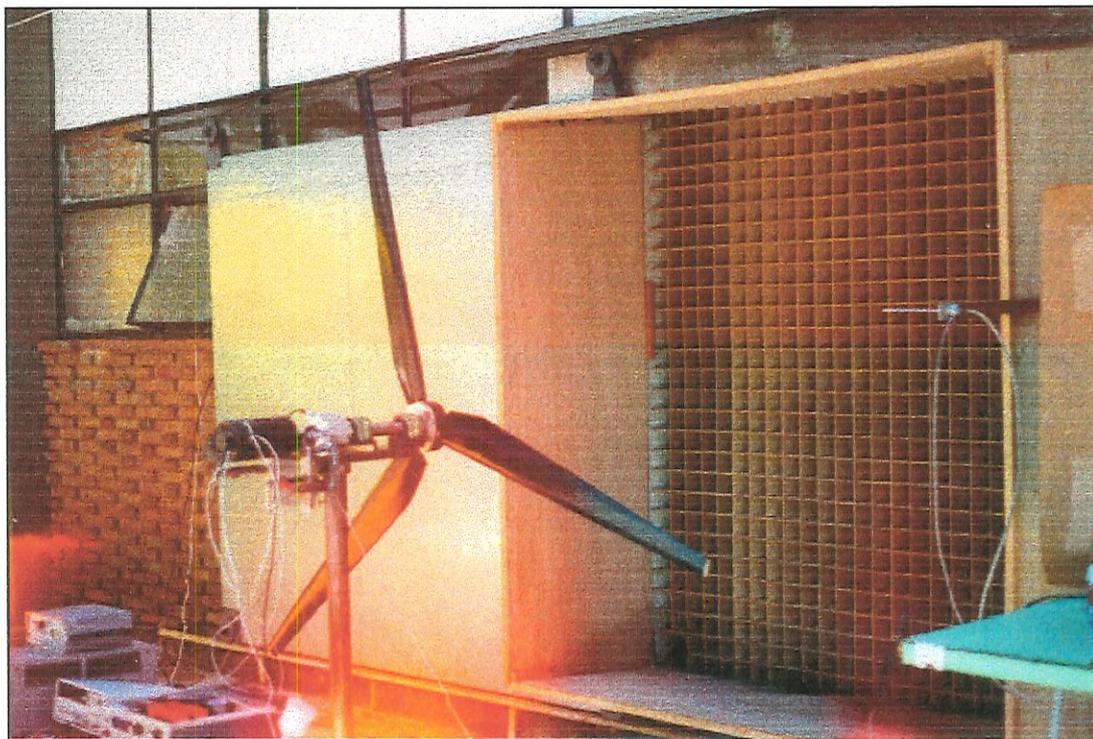


FIGURA 4.1 – Fotografia do modelo montado na saída do túnel de vento.

4.2.2.1 – Medição do Torque e da Rotação

Basicamente, um ensaio de turbina eólica de eixo horizontal se concentra nas medidas de torque e de rotação. Como a natureza dessa pesquisa é aerodinâmica, as medidas a serem tomadas, como no caso da pá parada, seriam a sustentação e o arrasto no rotor girando. No entanto, com a limitação de equipamentos, a análise aerodinâmica foi feita com relação a perda de potência e torque, devido a presença de elementos rugosos que, conforme a literatura, provocam uma queda no nível de sustentação e conseqüente queda da potência.

O esquema montado para a medição da rotação e do torque está mostrado na FIGURA 4.2 a seguir:

- (1)Cubo
- (2)Mancais de rolamento
- (3)Eixo
- (4)Transdutor de torque
- (5)Dínamo
- (6)Ligação da fonte
- (7)Carga Resistiva
- (8)Placa de suporte do conjunto cinemático
- (9)Torre

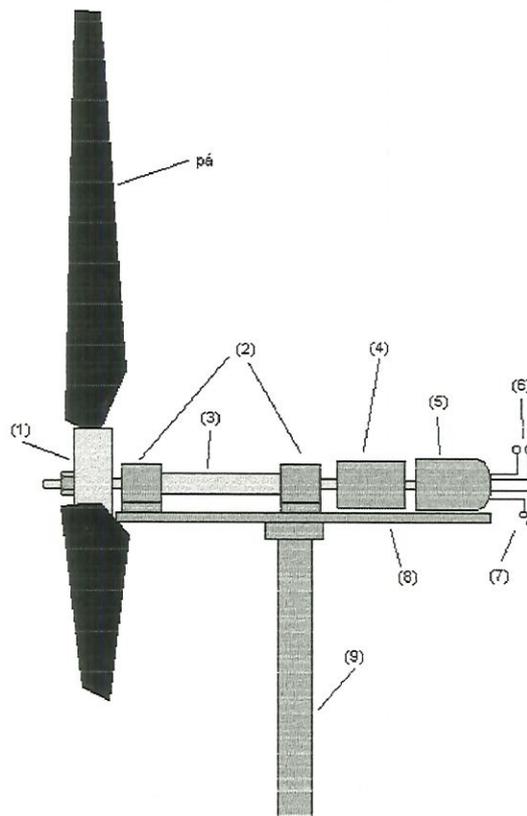


FIGURA 4.2 – Desenho esquemático do conjunto cinemático

O torque foi medido através de um transdutor de torque (marca: JS – Sistemas mecânicos) que foi acoplado ao eixo e ligado a um multímetro analógico, cuja medida tem saída em milivolts. Por outro lado, a rotação foi

medida através de um tacômetro, cujo sensor foi colocado próximo ao eixo entre o transdutor de torque e o dínamo. A leitura de saída foi em Hertz.

Colocou-se, também no eixo, um freio mecânico manual, cujo acionamento gradual foi feito para fornecer carga e possibilitar a leitura do torque, embora as medidas iniciais tenham sido feitas sempre com a turbina girando livremente, ou seja, sem acionar o freio (consequentemente, sem carga). As leituras da máxima rotação foram então anotadas, em seguida acionou-se o freio (acrescentando-se carga), e a partir daí foram feitas as leituras do torque e da rotação.

A velocidade do fluxo, na saída do túnel foi controlada através da aceleração do motor do túnel de vento e tentou-se mantê-la relativamente constante, exceto em algumas configurações do rotor que exigia uma velocidade um pouco maior, conforme esclarecido mais adiante. Essa velocidade foi calculada por meio da diferença de pressão (em milímetros de coluna de água), através de tubo de pitot ligado a um manômetro, tipo Betz.

As medidas de torque e de rotação foram feitas para vários ângulos de passo da pá: 0, 5, 10, 15, 20 e 25 graus, bem como para a superfície da pá lisa (sem rugosidade) e para a superfície da pá rugosa. Os tamanhos de grãos adotados foram os mesmos adotados no ensaio com a pá parada, ou seja, $k=0.149\text{mm}$ e $k=0.25\text{mm}$.

Uma vez obtidos os dados do torque e da rotação medidos diretamente no eixo, calculou-se a potência. Para analisar aerodinamicamente o desempenho da turbina, essas medidas de torque e de potência foram adimensionalizadas e quantificadas em percentuais de perda.

4.2.2.1.1 - Ensaio com pá lisa, sem rugosidade

O primeiro ensaio realizado foi executado na turbina girando com suas pás lisas, ou seja, sem a presença de elementos de rugosidade.

Mediu-se, então, o torque gerado e a rotação, para os ângulos de passo de 0, 5, 10, 15, 20 e 25 graus, conforme procedimento descrito na seção anterior.

4.2.2.1.2 – Ensaio com a pá rugosa

Os tamanhos de grãos adotados nesse ensaio estão descritos na Tabela 4.4, a seguir:

TABELA 4.4 - Tamanhos de grãos adotados no ensaio de rugosidade com o Rotor girando.

Faixa de aplicação da rugosidade em função da corda (%c)	Tamanho de grão adotado [mm]	
0.04	0.149	0.25
0.08	0.149	0.25
0.12	0.149	0.25
0.16	0.149	0.25
0.20	0.149	0.25
0.24	0.149	0.25

O ensaio de rugosidade foi feito, inicialmente, com os grãos de areia de tamanho $k=0.149\text{mm}$. Esses grãos foram colados na superfície da pá, considerando as faixas de 4, 8, 12, 16, 20 e 24% da corda. O primeiro ensaio de rugosidade foi feito com a areia colada sobre a faixa de 4% da corda (na direção do bordo de ataque ao bordo de fuga), ao longo de todo o raio da pá. Nesse ensaio, foram medidos também o torque e a rotação para os vários ângulos de passo adotados, análogo ao ensaio com a pá lisa, sem rugosidade.

Após o ensaio com a rugosidade depositada em até 4% da corda foi aumentando-se a faixa de rugosidade para 8, 12, 16, 20 e 24% da corda, de forma sucessiva. Todo o procedimento anterior foi repetido.

Analogamente ao ensaio com a rugosidade anterior, realizou-se um outro ensaio com novo tamanho de grão, ou seja, com $k=0.25\text{mm}$.

4.2.2.2 – Ensaio de visualização

O ensaio de visualização com a pás do rotor girando foi feito com a mesma solução utilizada no ensaio de visualização da pá parada, ou seja, com a solução de naftaleno. O procedimento adotado foi semelhante, com a diferença de que, ao acionar o motor do túnel de vento para gerar o fluxo, o rotor girou livremente e após um dado tempo em que a solução de naftaleno sublimou e a região de transição tornou-se visível, registrou-se a imagem do escoamento. Este procedimento foi repetido para ângulos de passo de 0, 5, 10, 15, 20 e 25 graus.

De maneira análoga do ensaio com a pá parada, ensaio com o rotor girando, as imagens registradas forneceram dados para o levantamento das curvas de transição da camada limite, para cada ângulo de passo adotado.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Ensaio da pá parada dentro do túnel

5.1.1 – Ensaio com a pá lisa e com a pá rugosa

5.1.1.1 - Curvas de Sustentação (C_L x α)

As curvas da sustentação em função do ângulo de ataque foram plotadas para várias faixas de rugosidade e tamanhos de grão sobre a pá, bem como para a pá lisa, conforme citado anteriormente. A força de sustentação medida foi a força total, atuando sobre a pá inteira, expressa de forma adimensional (C_L) em função do ângulo de ataque (α).

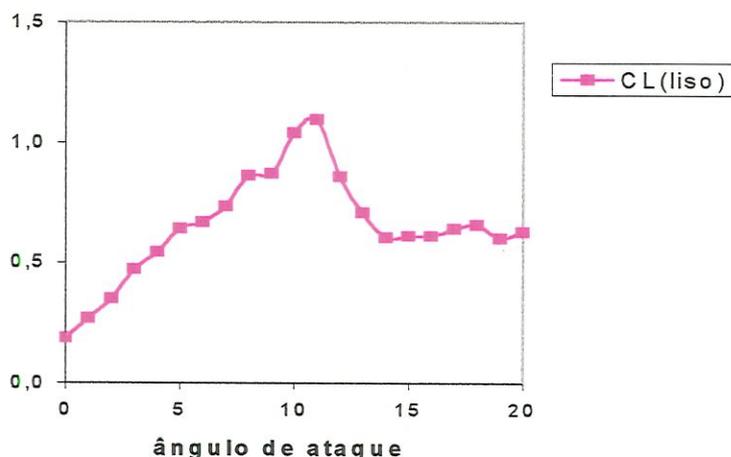


FIGURA 5.1 – Curva de sustentação para o caso liso.

Pode-se observar na curva de sustentação da FIGURA 5.1, plotada para o caso da pá lisa, que o coeficiente de sustentação máximo obtido foi aproximadamente 1.2, correspondendo a um ângulo de estol de 12 graus. No entanto, com a presença da rugosidade com de grãos de 0.149mm, colocada na faixa correspondendo até 4% da corda, como pode ser visto na FIGURA 5.2 abaixo, o coeficiente de sustentação caiu de 1.2 para aproximadamente 0.7 no ângulo de estol, mostrando claramente o efeito do elemento rugoso em toda a faixa de ângulo de ataque ensaiada. Este comportamento repetiu-se para as faixas seguintes de rugosidade, quais sejam: 8%, 12%, 16%, 20 e 24% da corda, conforme mostram as FIGURAS 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7, a seguir.

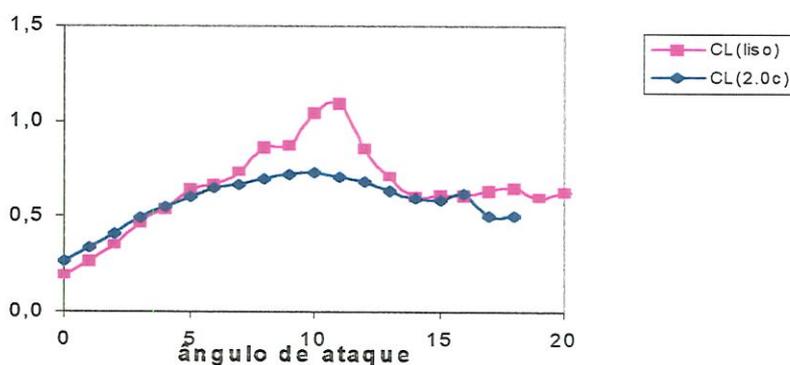


FIGURA 5.2 – Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada à 4% da corda.

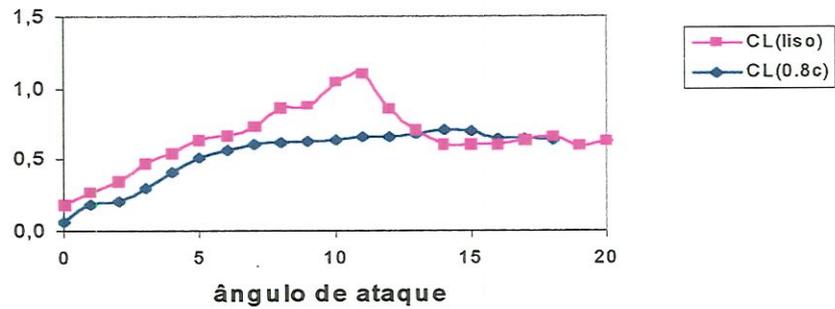


Figura 5.3 – Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada à 8% da corda

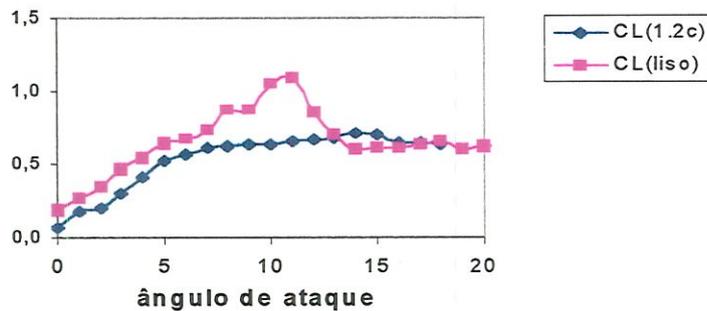


FIGURA 5.4 – Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada à 12% da corda.

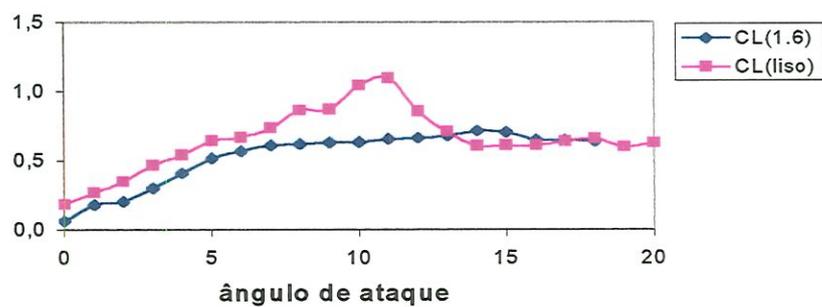


FIGURA 5.5 – Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada à 16% da corda.

Nas FIGURAS 5.6 e 5.7, a seguir, correspondendo a rugosidade de 0.149mm em 20% e 24% da corda, a faixa de ângulo de ataque adotada foi de 0 a 29 graus. A justificativa para utilização dessa faixa maior foi o fato de

se ter observado um comportamento repetido nos casos anteriores. Assim, percebeu-se que a curva de sustentação para o caso liso caiu significativamente logo após o estol (em 12 graus) e manteve-se até certo ponto constante entre 15 e 29 graus; por outro lado, considerando a rugosidade nas faixas de 20% e 24% da corda, embora a sustentação máxima tivesse caído quando comparada ao caso liso, esta não apresentava de forma clara o fenômeno do estol, tendo comportamentos considerados semelhantes a partir de 18 graus. No caso das FIGURAS 5.6 e 5.7, observa-se que entre os ângulos de ataque de 13 e 18 graus, houve um aumento de sustentação, comparando-se ao caso liso, já “estolado”. A partir dessa faixa, as curvas apresentaram um comportamento bem semelhante.

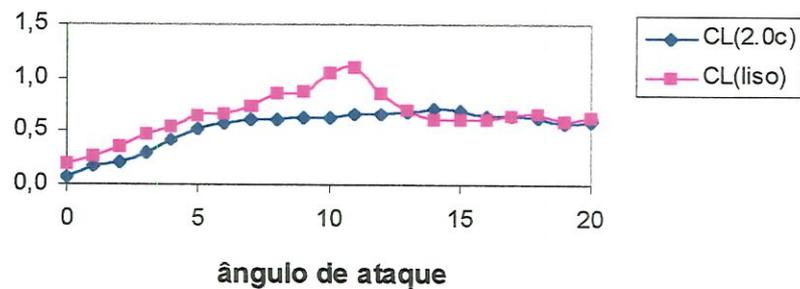


FIGURA 5.6 - Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada à 20% da corda.

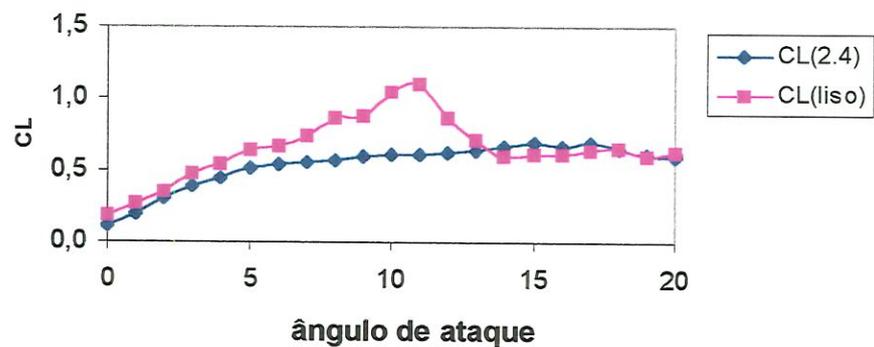


FIGURA 5.7 - Curva de sustentação para a rugosidade de 0.149mm colocada à 24% da corda.

As FIGURAS 5.8 e 5.9 apresentam as curvas de sustentação para o caso da rugosidade aplicada em 24% da corda, mas com tamanhos de grãos diferentes (de 0.21mm e 0.25mm, respectivamente).

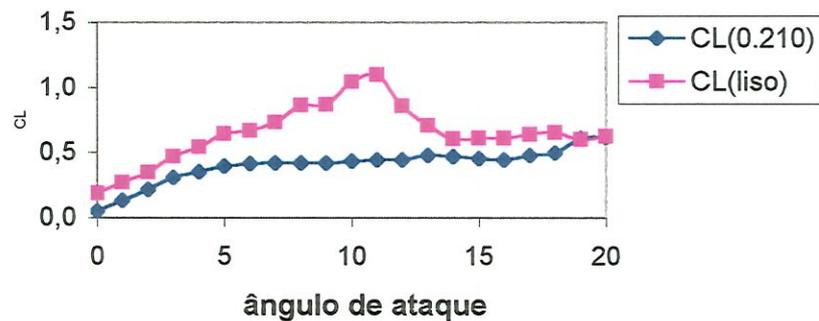


FIGURA 5.8 - Curva de sustentação para a rugosidade de 0.210 mm colocada à 24% da corda.

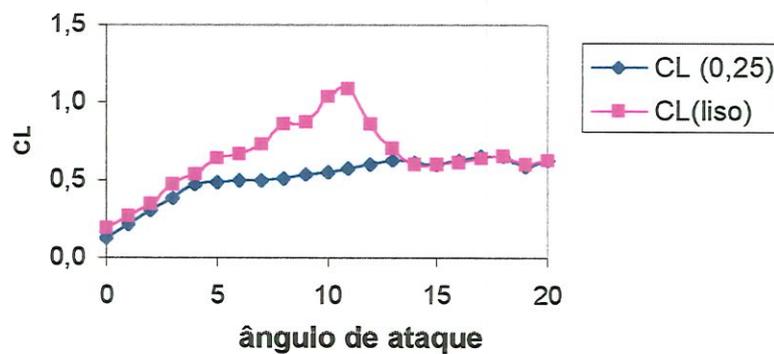


FIGURA 5.9 - Curva de sustentação para a rugosidade de 0.25 mm colocada à 24% da corda.

Observa-se nas FIGURAS 5.8 e 5.9 que, analogamente aos casos anteriores, houve uma queda evidente da sustentação, principalmente na região próxima ao estol. No entanto, para o caso da rugosidade com o grão de 0.210mm, registrou-se um aumento de sustentação a partir do ângulo de

ataque de 20 graus, enquanto no caso liso a pá já estava completamente “estolada”. Já na FIGURA 5.9, correspondente ao tamanho de grão de 0.25mm, na faixa de ângulo de ataque de 0 a 5 graus, não se registrou uma perda tão evidente da sustentação, ao contrário da região de 5 a 15 graus que apresentou uma queda significativa. Quando analisada a região correspondente à região pós estol do caso liso, observou-se um comportamento semelhante para ambas as curvas.

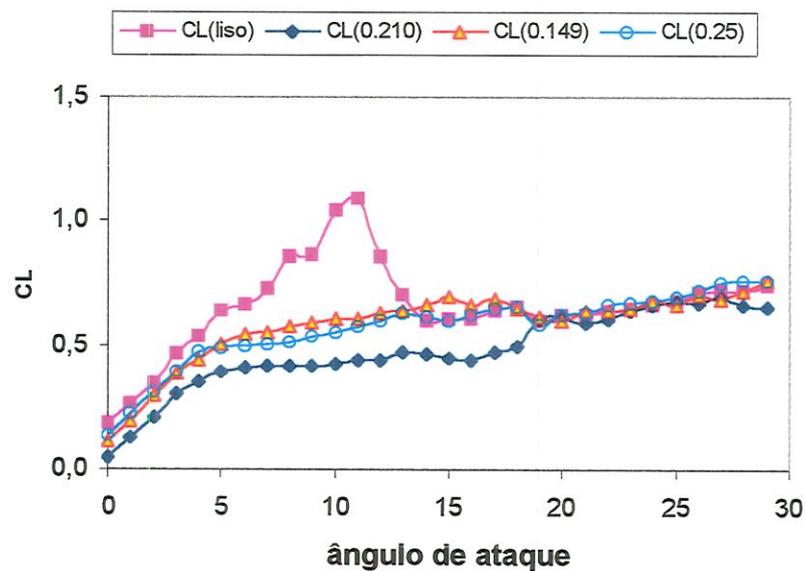


FIGURA 5.10 – Curvas de sustentação considerando um ângulo de ataque máximo de 29° para três tipos de tamanhos de grãos depositados na faixa de 24% da corda.

Para uma análise mais comparativa, numa mesma faixa de aplicação da rugosidade (24% da corda), foram plotadas as curvas, que mostravam três tamanhos de grãos diferentes (0.149mm, 0.21mm e 0.25mm). Estas curvas foram plotadas juntamente com a curva representativa do caso liso, para uma melhor visualização do efeito da rugosidade sobre a curva de sustentação, representada na FIGURA 5.10. Observa-se que, na faixa de ângulos de ataque entre 0 e 5 graus, as curvas se aproximaram, com exceção da curva de grão de 0.21mm. Já na região próxima ao estol, houve uma perda

evidente de sustentação no caso rugoso em comparação com o caso liso, com a curva de rugosidade de 0.21mm como a de mais baixo desempenho. Esperava-se que para tamanhos de grão da rugosidade maiores, a queda no desempenho aerodinâmico fosse maior, ou seja com diminuição maiores na seqüência 0.149 - 0,21 - 0,25mm. Contudo, observou-se que a perda não ocorreu necessariamente nessa ordem. Isso provavelmente pode ser atribuído a erros de medição, uma vez que esta discrepância ocorreu apenas na curva que representava o grão de 0.21mm. Para as outras duas curvas (0.149mm e 0.25mm) o comportamento seguiu conforme o esperado.

5.1.1.2 – Curvas de Arrasto ($C_D \times \alpha$)

Foi adotado o mesmo procedimento para o levantamento das curvas de sustentação nas curvas de arrasto, mostradas a seguir. Estas curvas de arrasto foram expressas de forma adimensional através do coeficiente de arrasto.

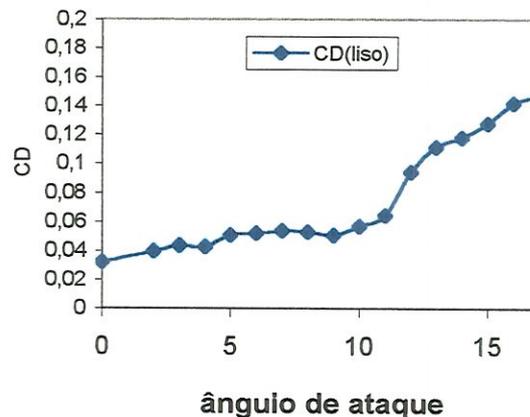


FIGURA 5.11 – Curva de arrasto para a pá lisa.

A FIGURA 5.11 mostra o comportamento do arrasto em função do ângulo de ataque, para o caso da superfície da pá lisa, sem rugosidade.

Observa-se nesta figura que o coeficiente de arrasto correspondente ao ângulo de estol foi de aproximadamente 0.06.

Comparando-se, então, a curva para o caso liso com a curva representando a rugosidade colocada na faixa de 4% da corda com o grão de 0.149mm, mostrada na FIGURA 5.12, observa-se que houve um aumento significativo do coeficiente de arrasto de 0.06 (caso liso) para 0.25, demonstrando claramente a influência da rugosidade. Até 5° notamos que houve um aumento significativo do arrasto de atrito. A partir de 5° o aumento foi basicamente devido à separação (arrasto de pressão). A separação a partir do bordo de fuga pode ser confirmada pela mudança de $dC_L/d\alpha$ nas curvas com rugosidade.

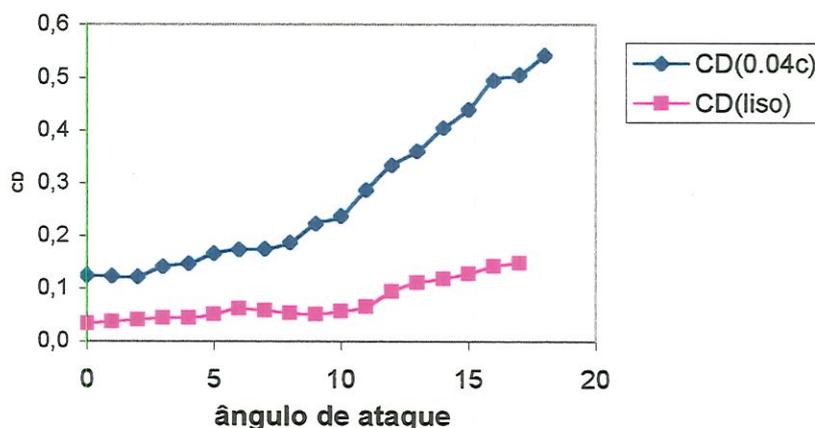


FIGURA 5.12 – Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 4% da corda.

Os resultados apresentados pelas FIGURAS 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 mostram que o arrasto aumentou com o aumento da faixa de aplicação da rugosidade para 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda, respectivamente, atingindo um valor máximo de 0.6, correspondente a faixa de rugosidade de 20% da corda (FIGURA 5.16).

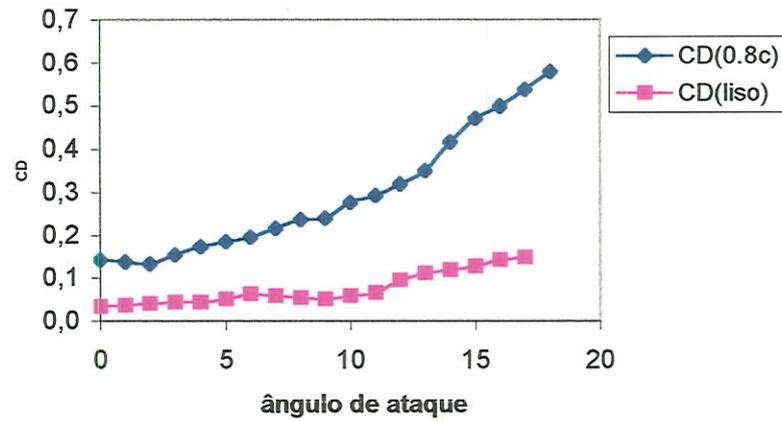


FIGURA 5.13 – Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 8% da corda.

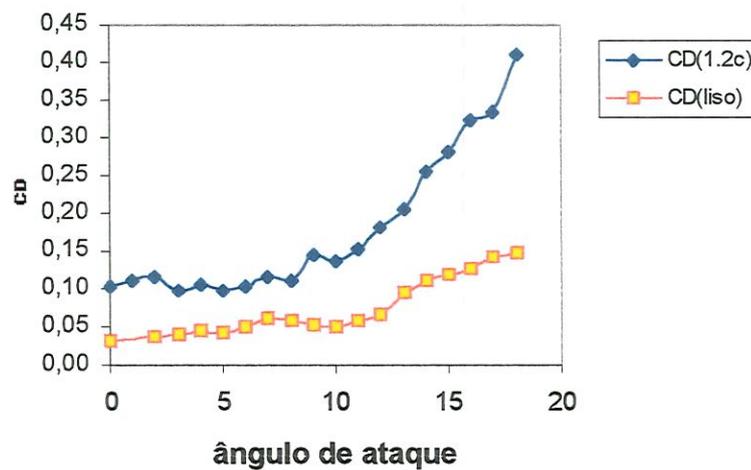


FIGURA 5.14 – Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 12% da corda.

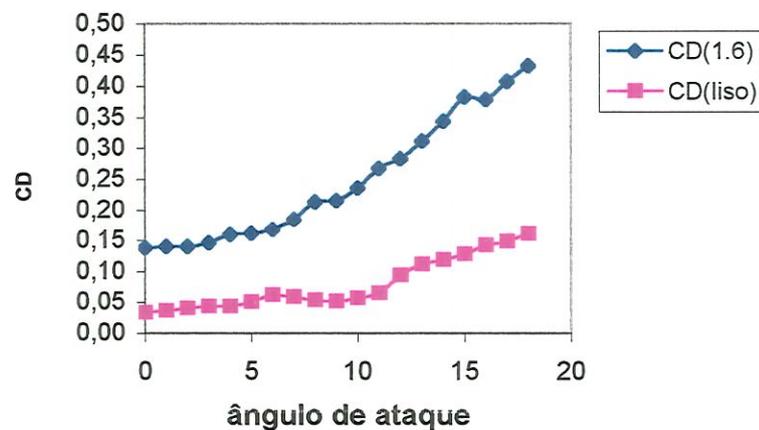


FIGURA 5.15 – Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 16% da corda.

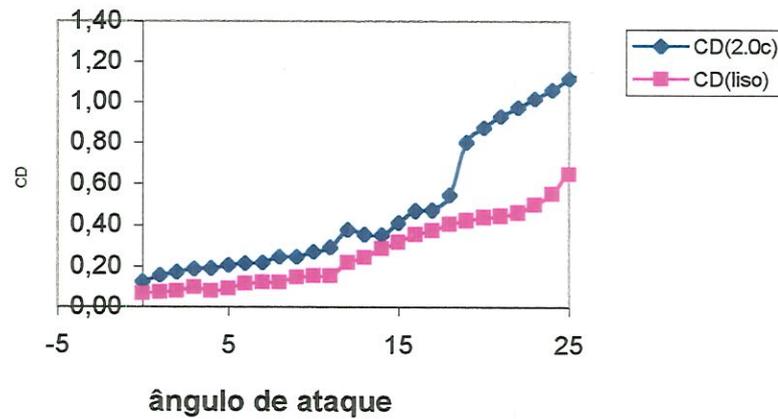


FIGURA 5.16 – Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 20% da corda.

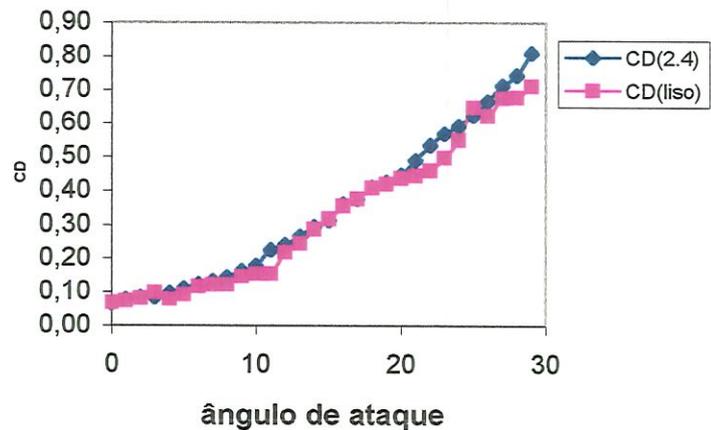


FIGURA 5.17 – Curva de arrasto para a rugosidade de 0.149mm colocada à 24% da corda.

Ao contrário do que se esperava, o coeficiente de arrasto para a faixa de rugosidade em 24% da corda (FIGURA 5.17) foi menor do que o arrasto registrado para 20% da corda (FIGURA 5.16). Entretanto, pode-se observar nas curvas apresentadas anteriormente que o coeficiente de sustentação para a rugosidade em 20% da corda (FIGURA 5.6) foi maior do

que o coeficiente de sustentação observado para a rugosidade de 24% da corda (FIGURA 5.7), evidenciando a explicação teórica de que o arrasto aumenta com o aumento da sustentação. Mesmo considerando esta explicação, esperava-se que o arrasto fosse maior para o tamanhos de grão maiores. No entanto, a ocorrência de instabilidades na rede elétrica durante o experimento pode ter contribuído para esta discrepância. Estas instabilidades ocorridas foram de natureza diversa como, por exemplo, o ruído que normalmente não pode ser eliminado. Considerando o horário de execução do experimento, quando normalmente diversos outros equipamentos elétricos estão sendo usados no Laboratório. Em certos casos a medida foi da ordem de grandeza do ruído registrado.

Da mesma forma que se utilizou o grão de 0.149mm em 24% da corda, dois outros tamanhos de grãos, 0.21mm e 0.25mm, também foram testados.

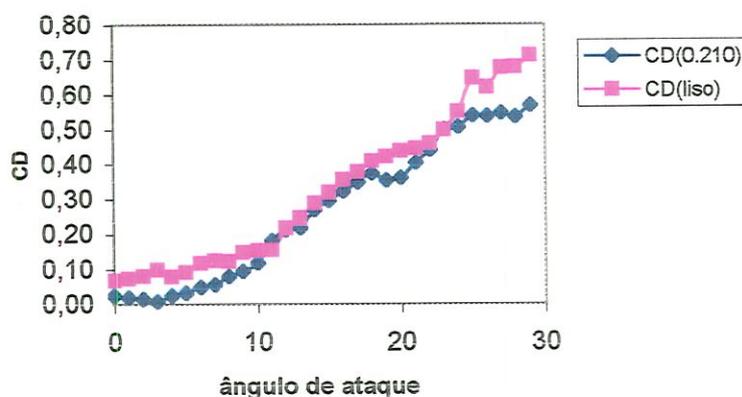


FIGURA 5.18 – Curva de arrasto para a rugosidade de 0.210mm colocada à 24% da corda.

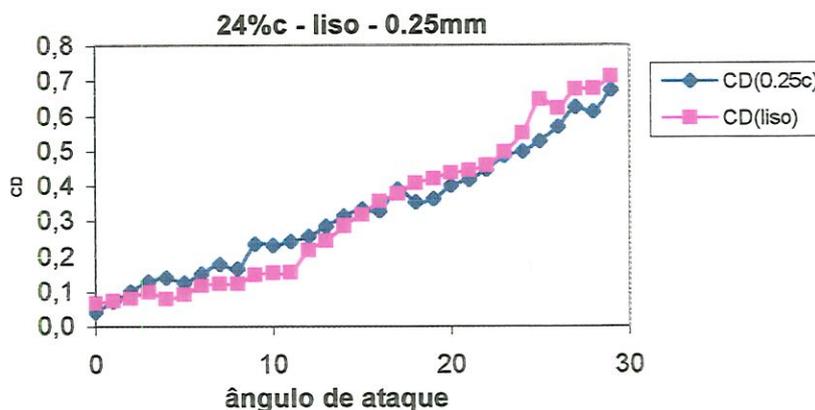


FIGURA 5.19 – Curva de arrasto para a rugosidade de 0.25mm colocada à 2.4% da corda.

As FIGURAS 5.18 e 5.19 mostram esta análise comparativa da mesma faixa de aplicação da rugosidade, ou seja, a faixa de até 24% da corda. Pode-se observar que, embora para o caso da sustentação tenha abaixado com o aumento do tamanho de grão, o arrasto não aumentou de forma significativa, mostrando que nessa faixa estudada, a presença da rugosidade não esteve ligada ao aumento do arrasto, pelo menos não de maneira significativa.

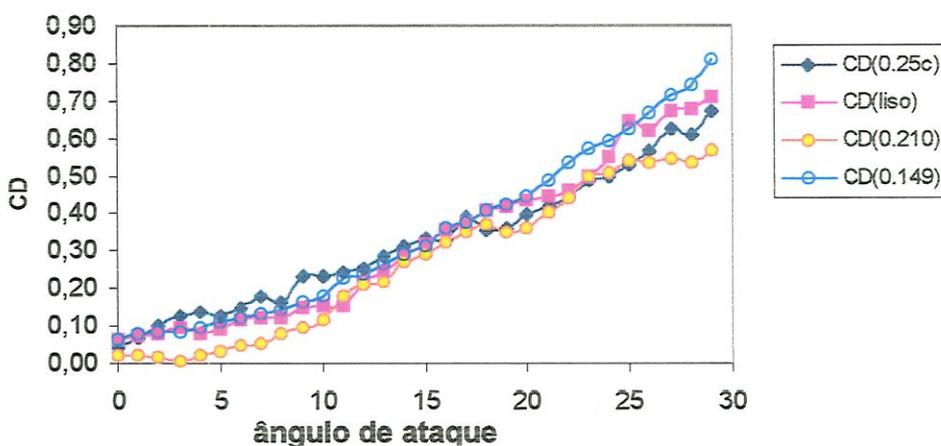


FIGURA 5.20 – Curvas de arrasto agrupadas de acordo com a granulometria para posição de 24% c.

Para uma melhor visualização das curvas de arrasto para os três tamanhos de grão adotados na faixa citada (24% da corda), estas foram plotadas as curvas rugosas juntamente com a curva representativa do caso liso (FIGURA 5.20). Observa-se que o caso liso apresentou um menor coeficiente de arrasto correspondente ao ângulo de estol, depois, na seqüência, a de 0.21mm, a 0.149 e por último a de 0.25mm.

De modo geral, ficou evidente a influência negativa da rugosidade sobre as curvas de sustentação e arrasto aqui apresentadas.

5.1.2 – Ensaio de Visualização

No ensaio de visualização foram plotadas as curvas $r/R \times x/c$ para análise da transição da camada limite ao longo do raio da pá em função da corda e do ângulo de ataque, como mostram as figuras a seguir.

a) Superfície inferior da pá:

Considerando primeiramente a superfície inferior, ou intradorso da pá, observa-se através da FIGURA 5.21, mostrando o local da transição de fluxo (de regime laminar para o regime turbulento) para uma ângulo de ataque de 0 grau, que o comportamento laminar aparece na maior parte da pá, ao longo de todo o raio. Na posição de 10% do raio, o fluxo apresentou um comportamento laminar na faixa compreendida de aproximadamente 60% da corda, aumentando-se gradativamente até a ponta da pá.

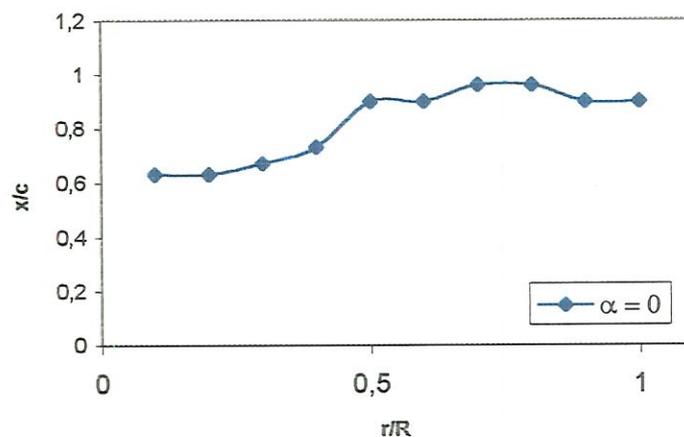


FIGURA 5.21 – Transição da camada limite com ângulo de ataque de 0 grau.

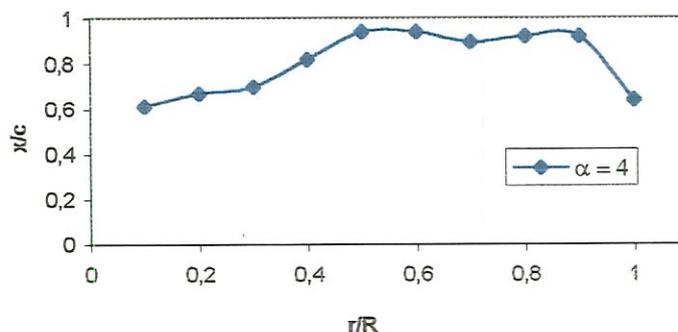


FIGURA 5.22 – Transição da camada limite com ângulo de ataque de 4 graus.

Observando-se agora o comportamento de transição do escoamento para a pá colocada num ângulo de ataque de 4 graus (FIGURA 6.22), pode ser visto que na região próxima a raiz da pá (até 40% do raio) a transição ocorreu mais cedo, a partir de 60% da corda, do que na região mais distante da raiz (50% do raio e mais adiante), quando a transição do regime ocorreu em mais de 70% da corda. Isto se deve ao tipo de aerofólio e a efeitos secundários entre a pá e a parede do túnel.

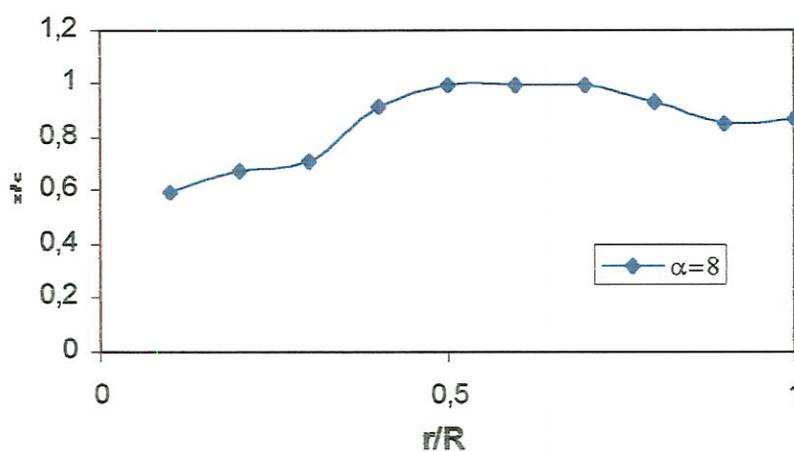


FIGURA 5.23 – Transição da camada limite com ângulo de ataque de 8 graus.

Já a curva plotada para um ângulo de ataque 8 graus, mostrada na FIGURA 5.23, o comportamento observado na curva anterior repetiu-se de certa forma, com a diferença de que a pá apresentou um escoamento laminar numa faixa um pouco maior do que no caso anterior, ou seja, a transição mais rápida só ocorreu até 40% do raio.

À medida que o ângulo de ataque aumentou, como expresso nas FIGURAS 5.24 e 5.25 que a pá apresentou um escoamento cada vez mais laminar apresentou uma extensão de escoamento laminar maior em toda a sua envergadura.

Uma observação interessante foi verificada, quanto ao regime de fluxo na região do estol (12 graus), apresentada na FIGURA 5.24. A partir desse ângulo de ataque, o fluxo apresentou um comportamento quase que totalmente laminar.

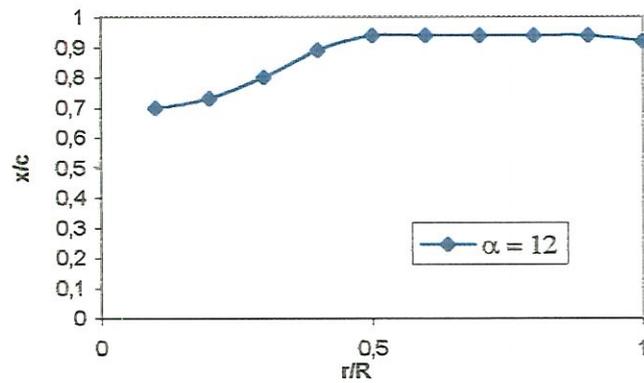


FIGURA 5.24 – Transição da camada limite com ângulo de ataque de 12 graus.

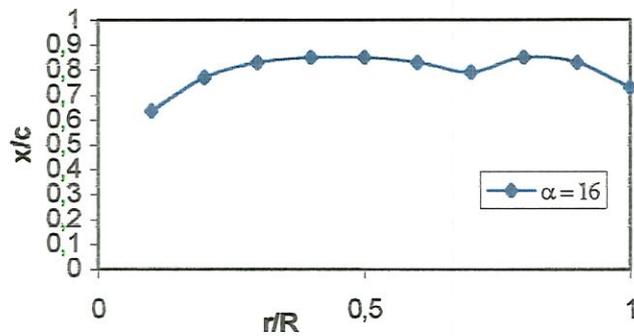


FIGURA 5.25 – Transição da camada limite com ângulo de ataque de 16 graus.

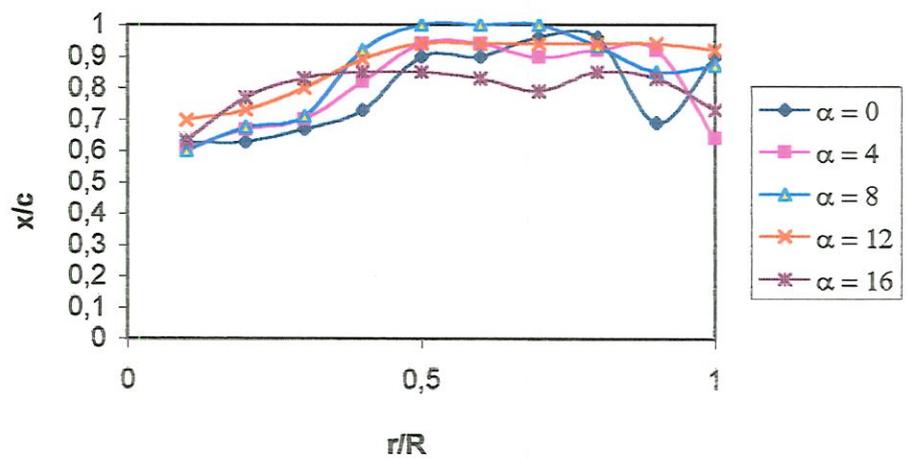


FIGURA 5.26 – Curvas de transição comparativas para os ângulos de ataque de 0, 4, 8, 12 e 16 graus.

Para apresentar de forma mais clara o fenômeno de transição do escoamento, após o registro das imagens, as curvas correspondentes aos ângulos de ataques adotados foram plotadas e agrupadas, conforme apresentam as FIGURAS 5.26 e 5.27.

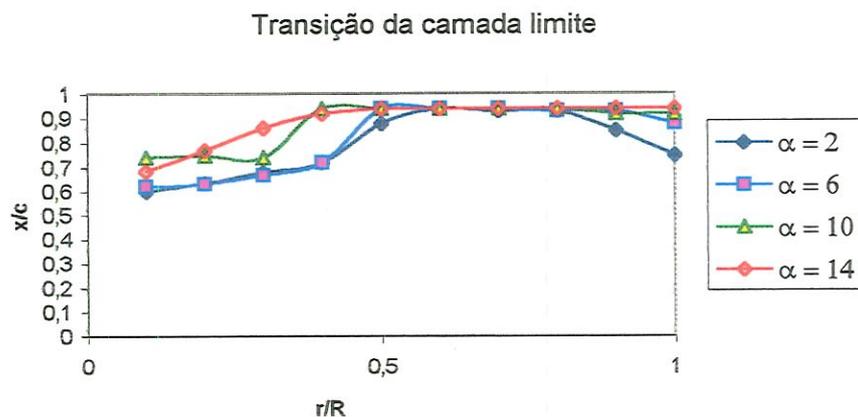


FIGURA 5.27 – Curvas de transição comparativas para os ângulos de ataque de 2, 6, 10 e 14 graus.

Nota-se na região onde o perfil aerodinâmico possui concavidade na parte traseira, que devido ao gradiente de pressão adverso, a transição ocorreu mais cedo (FIGURA 5.27). Este efeito é ainda maior nesta região de concavidade, para pequenos ângulos de ataque podendo, inclusive, ocorrer separação. Por esta razão é que utilizam-se geralmente estes tipos de perfis em regiões da pá que operam a altos ângulos de ataque e baixa velocidade.

b) Superfície superior da pá:

Considerando agora a superfície superior da pá, ou extradorso, observa-se, primeiramente, o comportamento do escoamento para o ângulo de ataque de 0 grau, apresentado pela FIGURA 5.28. Nota-se que o escoamento

transicionou mais cedo (em 45% da corda) do que na região da superfície inferior da pá, quando se compara a mesma faixa de comprimento de raio e ângulo de ataque (FIGURA 5.21). Neste caso, à medida que o raio aumentou, a faixa de fluxo no regime laminar em função da corda também aumentou, passando de 42% da corda (em 10% do raio) para aproximadamente 70% da corda (em 90% do raio). Isso se deve aos diferentes tipos de perfil utilizados na pá.

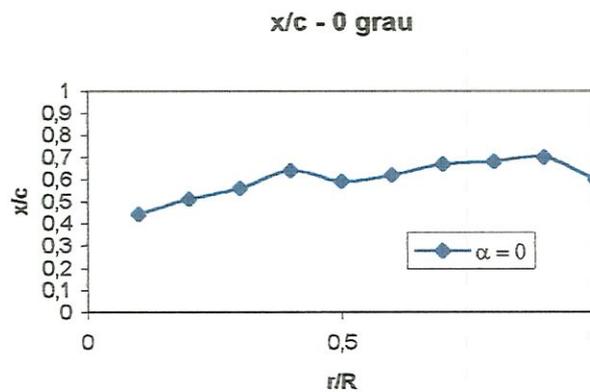


FIGURA 5.28 – Transição da camada limite com ângulo de ataque de 0 graus.

Para o ângulo de ataque de 4 graus (FIGURA 5.29), o comportamento do escoamento foi semelhante ao caso anterior, com uma diferença na região da ponta da pá, na faixa acima de 90% do raio, onde o regime observado foi quase totalmente laminar.

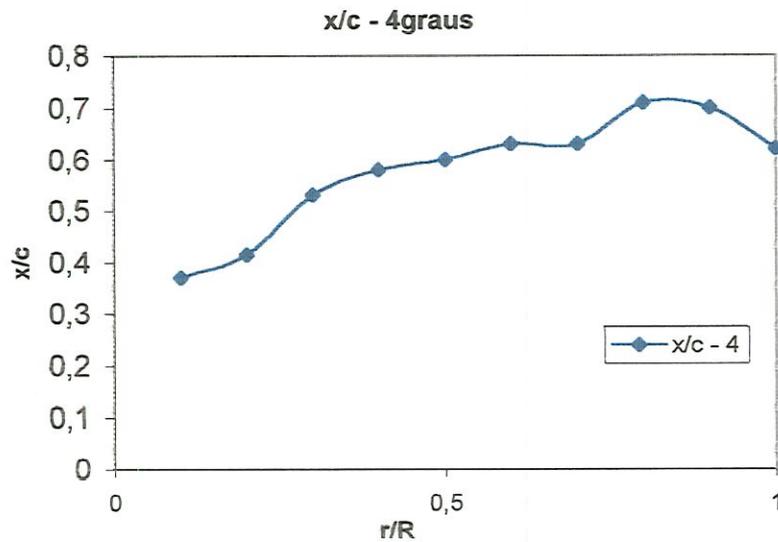


FIGURA 5.29 – Transição da camada limite com ângulo de ataque de 4 graus.

À medida que se aumentou o ângulo de ataque como era esperado, a região de escoamento laminar diminuiu, considerando sua posição ao longo da corda, conforme mostrado nas FIGURAS 5.30 e 5.31. Considerando inicialmente a curva apresentada na FIGURA 5.30, plotada para o ângulo de ataque de 8 graus, observa-se que à 10% do raio, a transição ocorreu em 35% da corda, enquanto para o ângulo de ataque de 12 graus (FIGURA 5.31), também na posição de 10% do raio, a transição ocorreu mais cedo, ou seja, em 20% da corda. Este comportamento repetiu-se em toda a extensão do raio da pá, com exceção da região da ponta que apresentou uma faixa laminar maior para o ângulo de ataque de 8 graus.

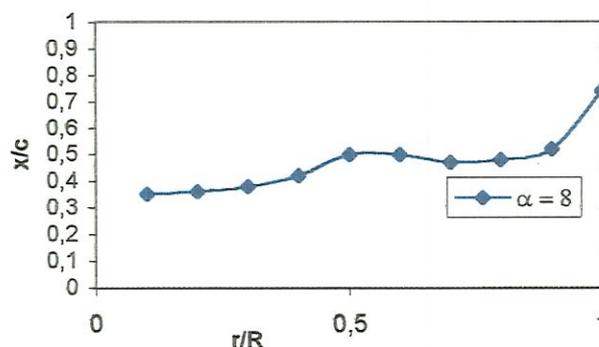


FIGURA 5.30 – Transição da camada limite com ângulo de ataque de 8 graus.

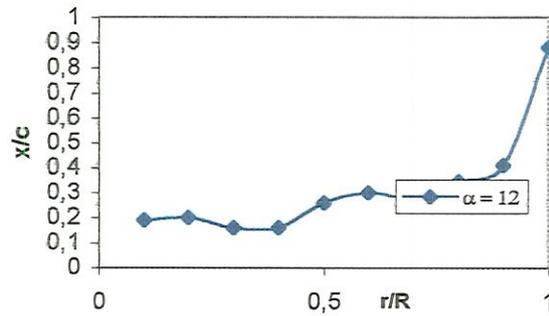
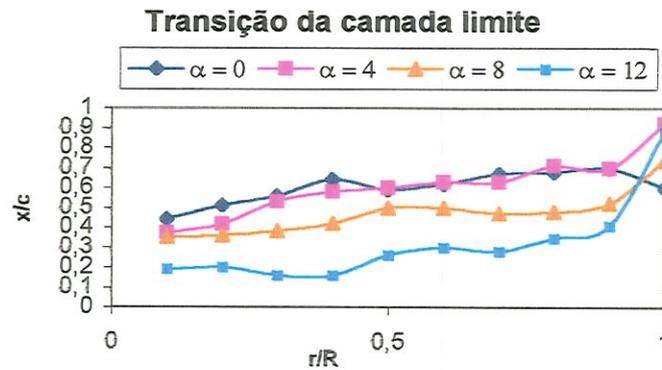


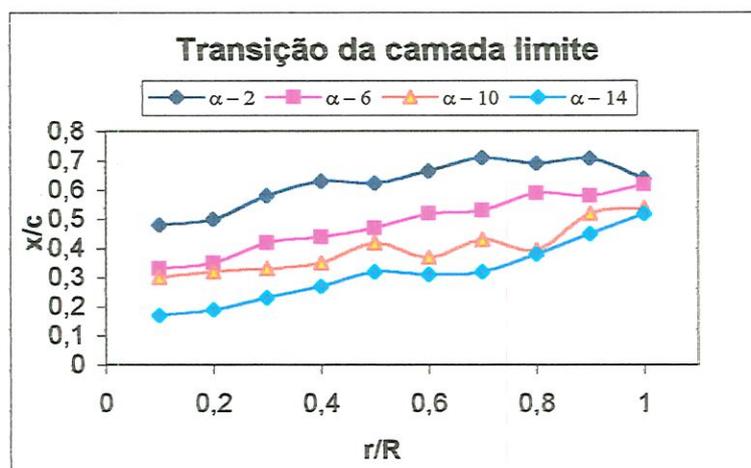
FIGURA 5.31 – Transição da camada limite com ângulo de ataque de 12 graus.



FIGURARA 5.32 – Curvas de transição comparativas para os ângulos de ataque de 0, 4, 8 e 12 graus.

Para melhor visualização do fenômeno de transição da superfície superior, as curvas plotadas anteriormente foram agrupadas, conforme apresenta a FIGURA 5.32, considerando os ângulos de ataque de 0, 4, 8 e 12 graus e a FIGURA 5.33, considerando os ângulos de ataque de 2, 6, 10 e 14 graus. Esta última apresentou para um ângulo de ataque de 14 graus, uma pequena faixa cujo fluxo foi totalmente laminar, na região próxima a 20% do raio, após o qual houve a transição de laminar para turbulento numa linha média compreendida entre 20% e 40% da corda. Deve-se lembrar aqui, que para o ângulo de 14 graus, a pá provavelmente já se encontrava no regime totalmente estolado. Quanto as outras curvas da FIGURA 5.32, percebe-se que

a transição da camada limite ocorreu mais cedo à medida que se aumentava o ângulo de ataque. Ainda nota-se que o tipo de perfil influencia sobremaneira na posição da transição, uma asa com um mesmo perfil ao longo da envergadura tenderia a apresentar uma faixa constante de escoamento laminar.



FIGURARA 5.33 – Curvas de transição comparativas para os ângulos de ataque de 2, 6, 10 e 14 graus.

Apresentando uma análise final sobre a transição da camada limite, ocorrendo sobre ambas as superfícies (intradorso e extradorso) das pás, é importante apresentar os resultados atingidos na região de 75% a 100% do raio, onde, de acordo com a literatura, ocorrem os fenômenos mais importantes, ou seja, os efeitos tridimensionais e de rotação, quando considerando o rotor girando. No entanto, como a análise nesta seção se restringe ao caso parado, os resultados obtidos são aqui apenas apresentados, e posteriormente comparados com o caso do rotor girando. Uma análise de grande importância será apresentada mais adiante, quanto ao comportamento do fluxo na região mais próxima ao cubo, cujo informação não foi encontrada na literatura existente.

5.2 – Ensaio com as pás do rotor girando

Na segunda etapa da pesquisa aqui apresentada, foram coletados os resultados considerando o rotor em funcionamento, conforme citado no capítulo anterior. Desta forma, os ensaios com a turbina em funcionamento foram de dois tipos: o ensaio de visualização do escoamento e o ensaio de quantificação de perda de potência e torque em função da rugosidade aplicada. De acordo com a literatura existente em aerodinâmica, a perda de potência e torque ocorre em função da queda dos níveis de sustentação experimentada pela pá, quando a turbina está em funcionamento, neste caso provocada pela presença da rugosidade. Os ensaios anteriores, com a pá parada dentro do túnel, confirmaram isto. Os gráficos apresentados nas Figuras a seguir fornecem informações quantitativas sobre a perda provocada pela rugosidade. O ensaio de visualização, foi feito variando-se o ângulo de passo e, calculando-se o ângulo de ataque equivalente. Desse modo, foi possível analisar o comportamento do fluxo (transição da camada limite), escoando sobre a superfície da pá lisa, comparando-o com o caso parado.

5.2.1 – Ensaio com a pá lisa e rugosa

Sendo a natureza desta pesquisa a aerodinâmica, com análise não extensiva a outras áreas, as figuras a seguir são expressas de forma adimensional, apresentando o nível de perda de desempenho (torque e potência) em função dos dois tamanhos de rugosidade adotadas. Uma rugosidade com tamanho de grão de 0.149mm e outra com tamanho de grão de 0.25mm, foi colocada em várias faixas de comprimento da corda ao longo de todo o raio da pá, como realizado no caso da pá parada. A quantidade de perda

de torque e potência é expressa sempre em termos de variação

$$\left(\frac{dC_P}{C_{P_i}} - \frac{C_{P_i} - C_P}{C_{P_i}} \right), \text{ comparando-se o caso rugoso e o caso liso.}$$

5.2.1.1 – Variação de geração de potência em função da rugosidade e do ângulo de passo

A análise da influência da rugosidade sobre a geração de potência, considerando vários ângulos de passo e várias faixas de rugosidade, em função da corda, é apresentada através dos gráficos mostrados nas FIGURAS 6.34 a 6.39.

a) Análise considerando a faixa de aplicação da rugosidade

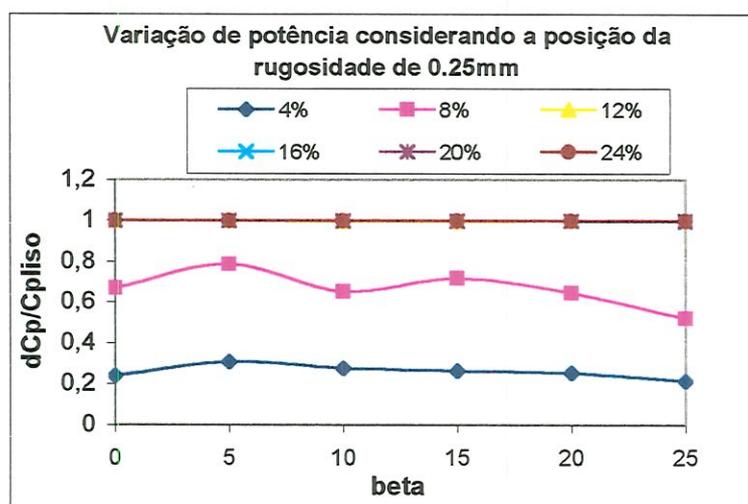


FIGURA 5.34 – Variação de geração de potência considerando a rugosidade de 0.25mm colocada em várias posições da corda

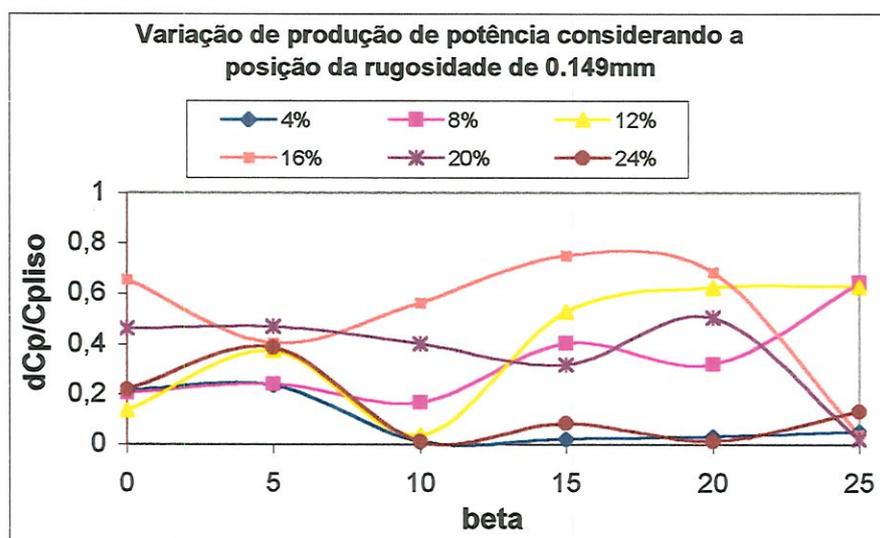


FIGURA 5.35 – Variação de geração de potência considerando a rugosidade de 0.149mm colocada em várias posições da corda

As FIGURAS 5.34 e 5.35 apresentam todas as curvas de variação de potência em função do ângulo de passo, levantadas para o tamanho de grão de 0.25mm e 0.149mm, colocados a 4%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda ao longo do raio, respectivamente. No entanto, para um melhor entendimento, a análise será feita, considerando uma mesma faixa de corda com tamanhos de grãos diferentes, conforme mostram as FIGURAS 5.36 a 5.49.

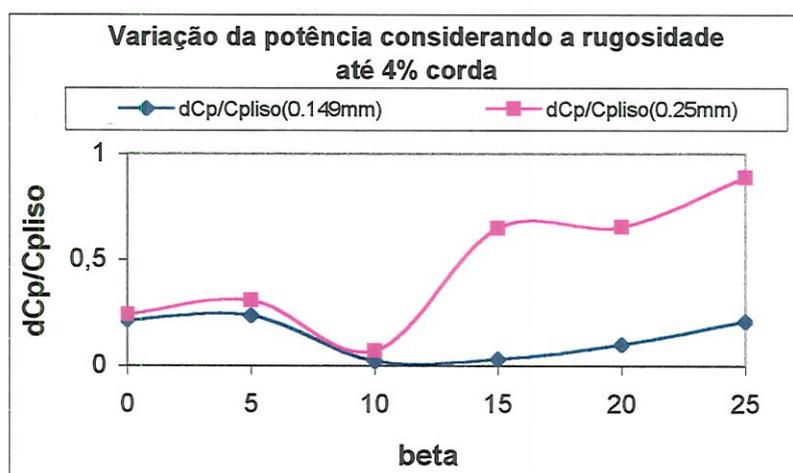


FIGURA 5.36 – Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 4% da corda.

Analisando-se a FIGURA 5.36, cuja variação de potência foi medida para vários ângulos de passo, observa-se que o comportamento aerodinâmico da pá não se alterou, quando comparando-se os dois tamanhos de grãos entre si (para o passo de 0 grau); por outro lado, ambos os tamanhos de grãos geraram uma mesma quantidade de perda de potência quando comparados ao caso da pá lisa, perda esta que foi de aproximadamente 23%.

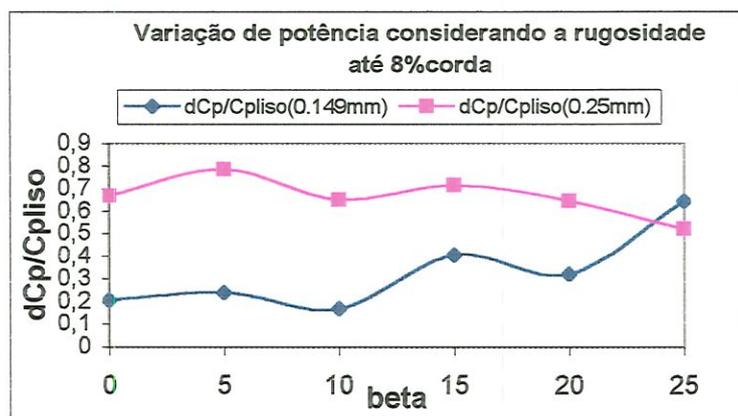


FIGURA 5.37 – Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 8% da corda.

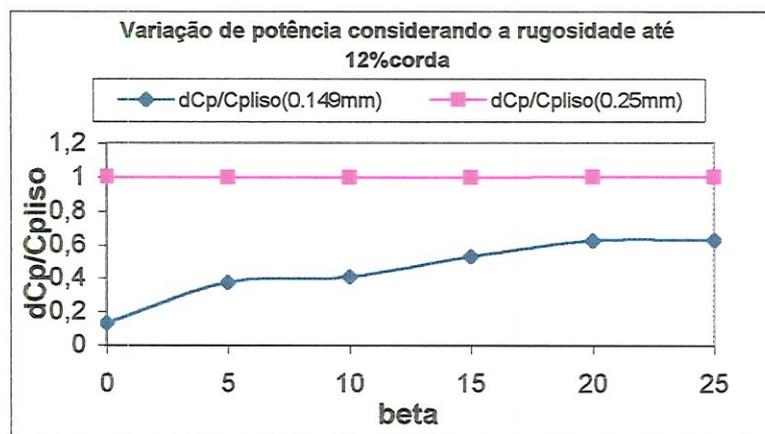


FIGURA 5.38 – Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 12% da corda.

Considerando agora as rugosidades colocadas a 8% e 12% da corda, conforme mostram as FIGURAS 5.37 e 5.38, respectivamente, a perda

observada do caso liso para o primeiro caso rugoso (tamanho de grão de 0.149mm) foi de 23%, enquanto para o caso seguinte (tamanho de grão de 0.25mm) a perda foi de 66%, mostrando assim a influência que essa rugosidade provoca sobre o desempenho total do sistema. Vale lembrar que esta perda citada corresponde a um ângulo de passo de 0 grau (máxima eficiência), o que significa que para todos os outros ângulos de passo adotados essa perda foi cada vez maior, como mostram todas as Figuras desta seção.

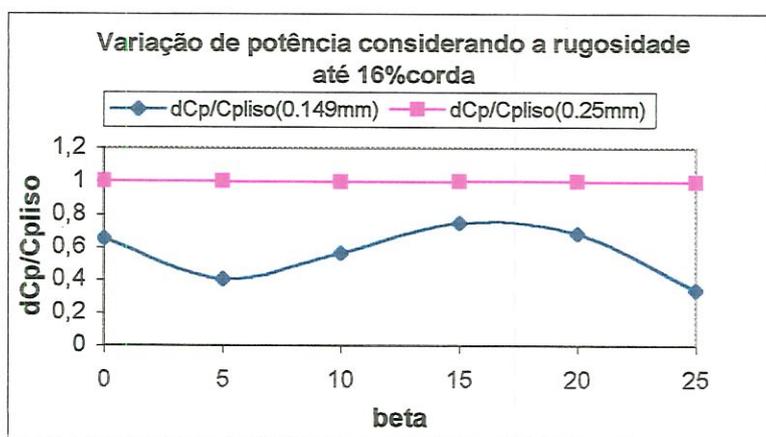


FIGURA 5.39 – Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 16% da corda.

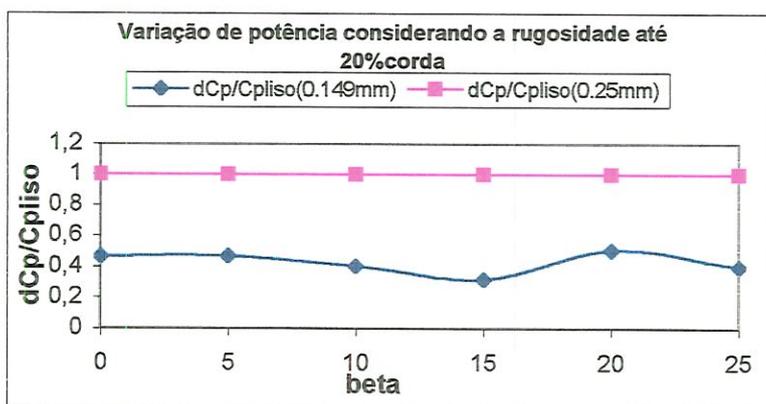


FIGURA 5.40 – Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 20% da corda.

À medida que a faixa de rugosidade foi ampliada o desempenho da turbina ficou cada vez mais crítico, como pode ser visto para os casos

seguintes em que as rugosidades foram colocadas à 16%, 20% e 24% da corda (FIGURAS 5.39, 5.40 e 5.41). Com a rugosidade em 16% da corda, para o tamanho de grão de 0.149mm, a perda chegou a 65% e para o tamanho de grão de 0.25mm a situação foi ainda mais crítica atingindo um valor aproximado de 98%.

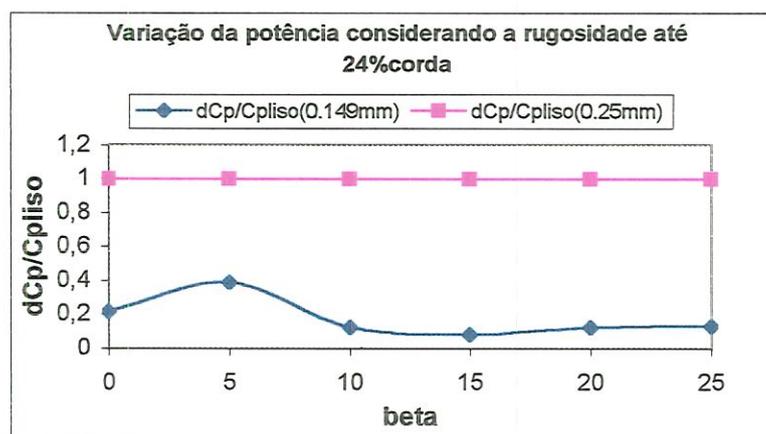


FIGURA 5.41 – Variação de potência gerada considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 24% da corda.

Para a rugosidade aplicada em 24% da corda (FIGURA 5.41) a perda foi visivelmente de 100% (para o tamanho de grão de 0.25mm) em relação a pá limpa. Por outro lado, para o tamanho de grão de 0.149mm a perda foi bem menor (cerca de 23%), menor até mesmo do que os casos anteriormente analisados para faixas de rugosidades menores, fato explicado pela variação da velocidade incidente sobre as pás do rotor, quando da execução do experimento.

Uma observação importante a ser feita é quanto ao ganho de energia registrado em alguns casos (FIGURAS 5.34). Durante a execução do experimento houve situações em que foi necessário aumentar a velocidade do fluxo gerado pelo túnel de vento para que a leituras de rotação pudessem ser registradas, uma vez que embora o torque fosse facilmente registrado, o mesmo não ocorria com a rotação, pois o tacômetro digital não fornecia de

forma constante leituras abaixo de 3 Hertz, levando a decisão de aumentar a velocidade, para possibilitar uma rotação mais alta.

b) Análise considerando a rugosidade e os ângulos de passo

Apresentando agora uma análise com um outro enfoque, ou seja, a influência da rugosidade, para vários ângulos de passo com as duas rugosidades adotadas, sobre a potência gerada pela turbina, chegou-se a resultados interessantes mostrados pelas FIGURAS 5.42 a 5.49.

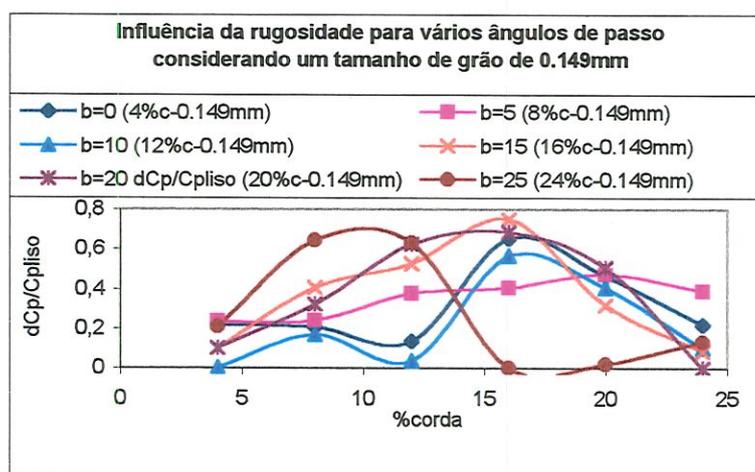


FIGURA 5.42 - Influência da rugosidade de 0.149mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de potência.

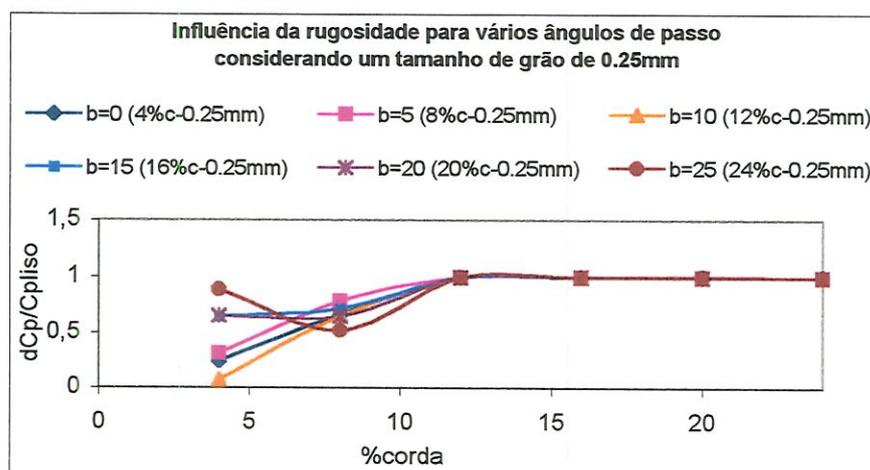


FIGURA 5.43 - Influência da rugosidade de 0.25mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de potência.

A FIGURA 5.42 apresenta as curvas de perda, considerando a rugosidade de 0.149mm em ângulos de passo de 0, 5, 10, 15, 20 e 25 graus, em relação ao caso liso. Já a FIGURA 5.43 apresenta as mesmas curvas, considerando a rugosidade de 0.25mm de modo análogo. No entanto, para melhor compreensão, as Figuras serão discutidas duas a duas.

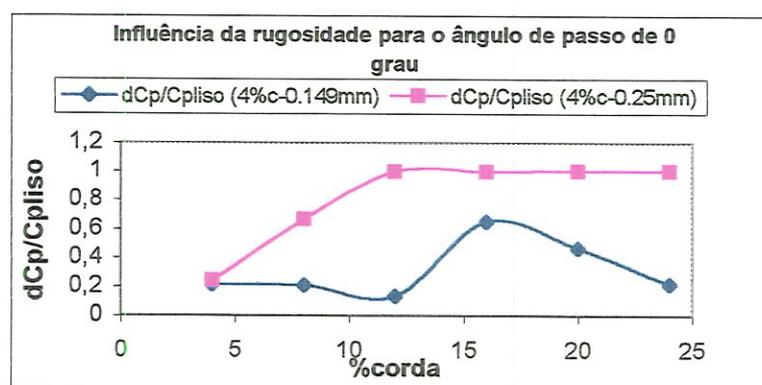


FIGURA 5.44 – Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 0 grau

Considerando o ângulo de passo de 0 grau, a FIGURA 5.44 mostra que a perda de potência foi praticamente a mesma para as duas rugosidades colocadas até 4% da corda (cerca de 23%), mas à medida que foi se ampliando essa faixa de rugosidade em função da corda, observou-se que a perda provocada pelo tamanho de grão maior foi crescente até aproximadamente 12% da corda, quando atingiu-se valores de quase 100% de perda da potência gerada. O fato de a perda ter se apresentado menor em 20% e 24% da corda, atribui-se ao fato de ter havido um aumento de velocidade do fluxo, conforme citado anteriormente. Já para o passo de 5 graus representado pela FIGURA 5.45, a seguir, a perda em 4% da corda para ambos os casos foi de 24% a 31%, aproximadamente, aumentando gradativamente à medida que se aumentava a faixa, atingindo um valor máximo de 46% para a rugosidade menor e 98% para a rugosidade maior.

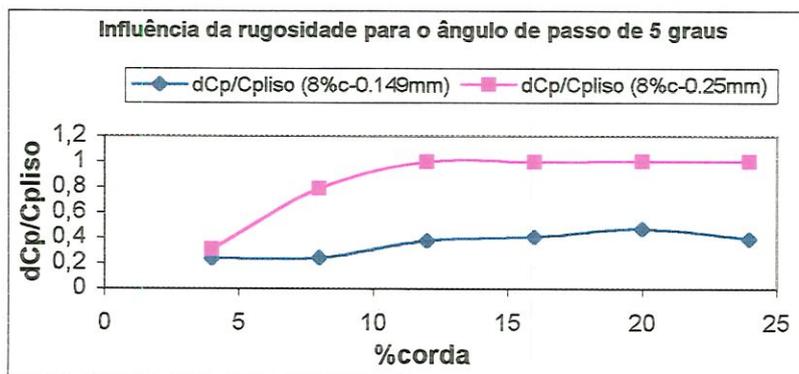


FIGURA 5.45 – Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 5 graus.

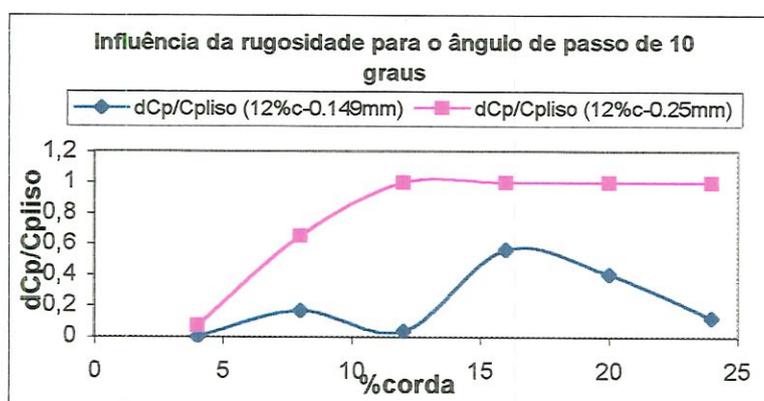


FIGURA 5.46 – Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 10 graus.

Para o ângulo de passo de 10 graus, observou-se de forma mais visível a perda crescente de potência em relação a rugosidade maior, enquanto que, para a rugosidade menor apresentaram-se grandes oscilações. No entanto, vale ressaltar que, como o primeiro ensaio foi para o tamanho de grão menor, iniciou-se o processo de análise de parâmetros para melhor funcionamento, uma vez que a mesma velocidade adotada para o rotor girando, sem rugosidade, não pode ser a mesma para os casos seguintes, em virtude da forte influência provocada pela presença da rugosidade. A velocidade para o caso liso foi de aproximadamente 7m/s atingindo, no caso da pá com a rugosidade

maior, uma velocidade de aproximadamente 11m/s. Esta diferença levou às variações registradas nas curvas seguintes.

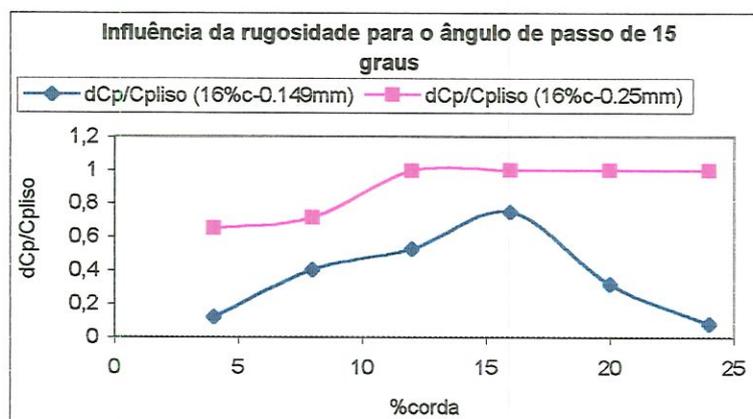


FIGURA 5.47 – Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 15 graus.

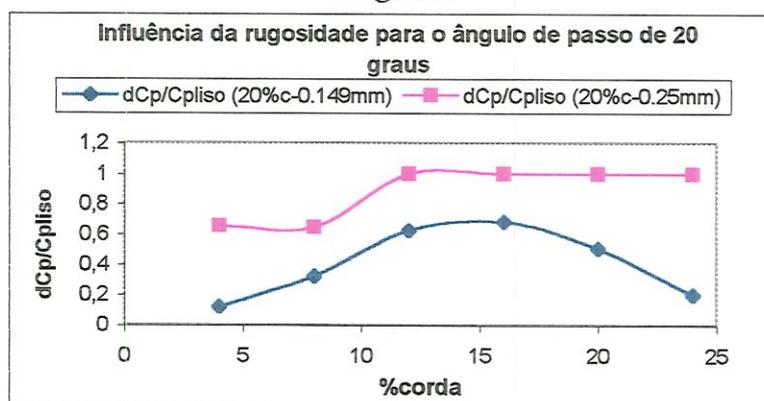


FIGURA 5.48 – Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 20 graus.

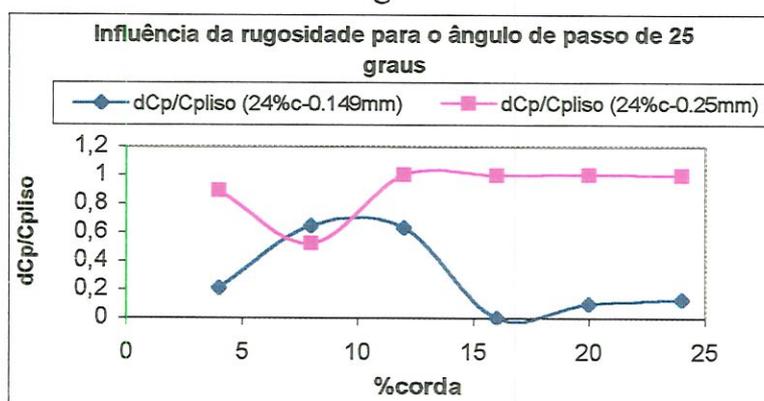


FIGURA 5.49 – Influência das rugosidades adotadas para o ângulo de passo de 25 graus.

5.2.1.2 – Variação de geração de torque em função da rugosidade e do ângulo de passo

A análise da influência da rugosidade sobre a geração de torque foi feita analogamente à análise da geração de potência, considerando vários ângulos de passo e várias faixas de rugosidade (em função da corda). Os resultados são apresentados através dos gráficos, das FIGURAS 5.50 a 5.65.

a) Análise considerando a faixa de aplicação da rugosidade

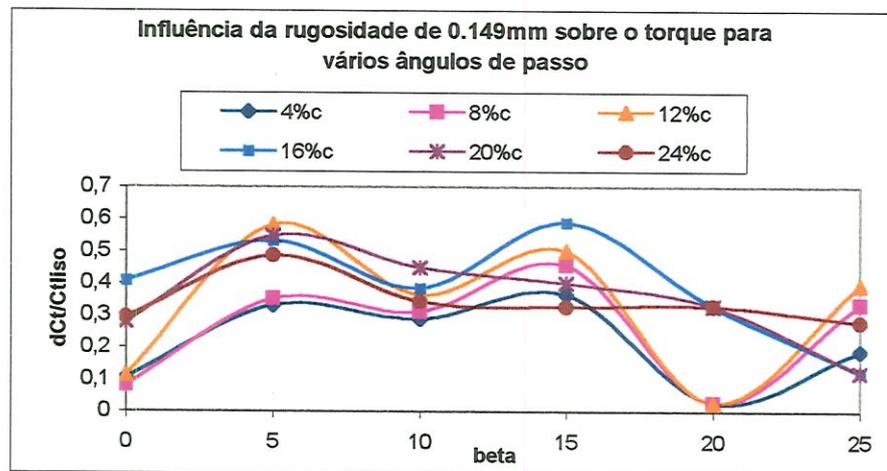


Figura 5.50 - Variação de geração de torque considerando a rugosidade de 0.149mm colocada em várias posições da corda.

As FIGURAS 5.50 e 5.51 apresentam todas as curvas de variação de torque em função do ângulo de passo, levantadas para o tamanho de grão de 0.149mm e 0.25mm, colocados a 4%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda ao longo do raio, respectivamente. Como na análise da perda de potência, aqui também será considerado uma mesma faixa de corda com tamanhos de grãos diferentes, conforme mostram as FIGURAS 5.52 a 5.65.

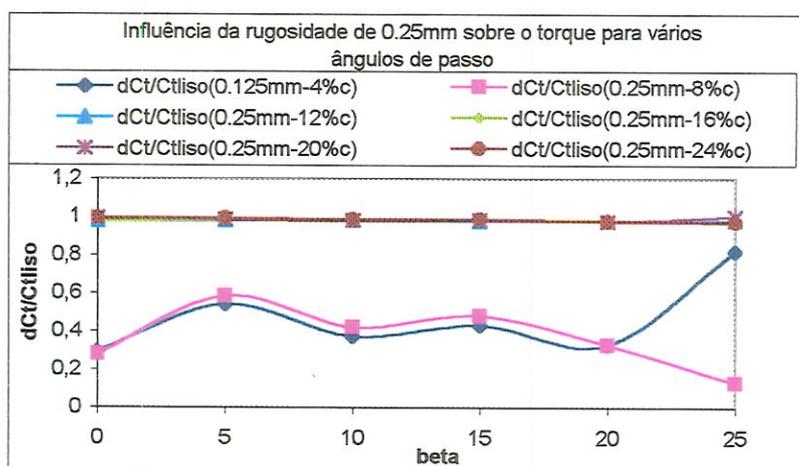


Figura 5.51- Variação de geração de torque considerando a rugosidade de 0.25mm colocada em várias posições da corda.

De acordo com a curva apresentada na FIGURA 5.52, considerando a rugosidade até 4% da corda, a perda de torque gerado pela turbina não excedeu 10% (para a rugosidade de 0.149mm) quando comparado ao caso liso, para um ângulo de passo de 0 grau. No entanto chegou a aproximadamente 30% considerando a rugosidade maior (0.25mm) também para o ângulo de passo de 0 grau. Observa-se, na FIGURA 5.52, que a rugosidade maior ocasionou uma perda maior de torque para todos os ângulos de passo, principalmente na faixa correspondente a menor eficiência (entre 5 e 25 graus).

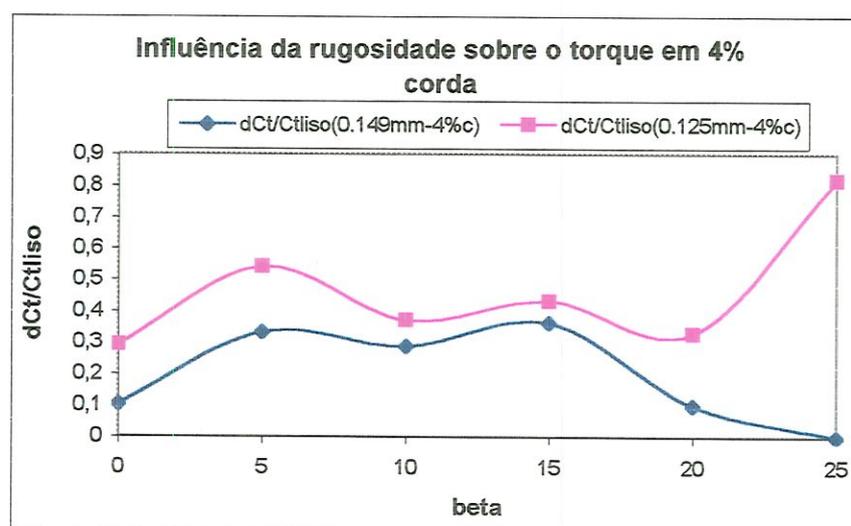


Figura 5.52- Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 4% da corda.

Estendendo a faixa de aplicação da rugosidade para 8% da corda (FIGURA 5.53), a 0 grau, a perda de torque manteve-se praticamente inalterada comparando-se com o caso anterior, para a rugosidade de 0.149mm e para a rugosidade de 0.25mm. Para o ângulo de passo de 5 graus, houve um aumento em ambos os casos. A partir de 10 graus, os registros feitos do torque e da potência variaram bastante com a presença da rugosidade, levando a necessidade de se aumentar a velocidade para fazer com que o rotor continuasse girando.

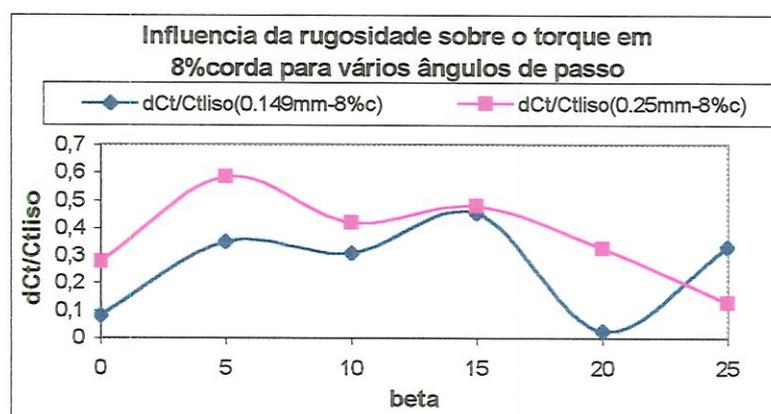


Figura 5.53 - Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 8% da corda.

Para faixas de rugosidade e tamanho de grãos maiores, observou-se que a situação ficou mais crítica, conforme pode ser visto nas FIGURAS 5.54 a 5.57. Enquanto o aumento da faixa de aplicação da rugosidade para o tamanho de grão de 0.149mm oscilou, devido a já citada variação da velocidade, a perda continuou sempre abaixo dos 60% (perda máxima), mostrada na FIGURA 5.55. Já para o tamanho de grão maior, a perda de torque se aproximou de 100% para todas as faixas de rugosidade acima de 12% da corda. Neste caso, observa-se que a rugosidade colocada até 8% da corda, com os grãos de 0.25mm, apresentam uma perda de torque nos níveis equivalentes a rugosidade anterior (0.149mm), colocada nas faixas acima de

12% da corda. Considerando-se, por exemplo, um ângulo de passo de 0 grau, as curvas obtidas também mostram que a sensibilidade da turbina ao grão maior foi bem mais evidente, enquanto no grão menor a sensibilidade foi menor.

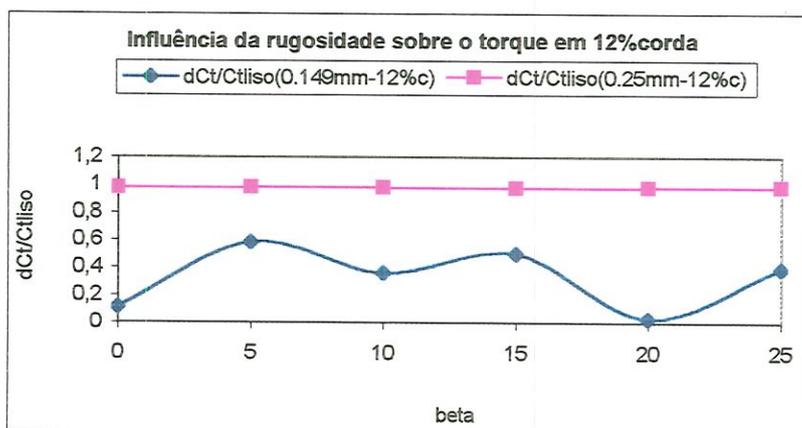


Figura 5.54 - Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 12% da corda.

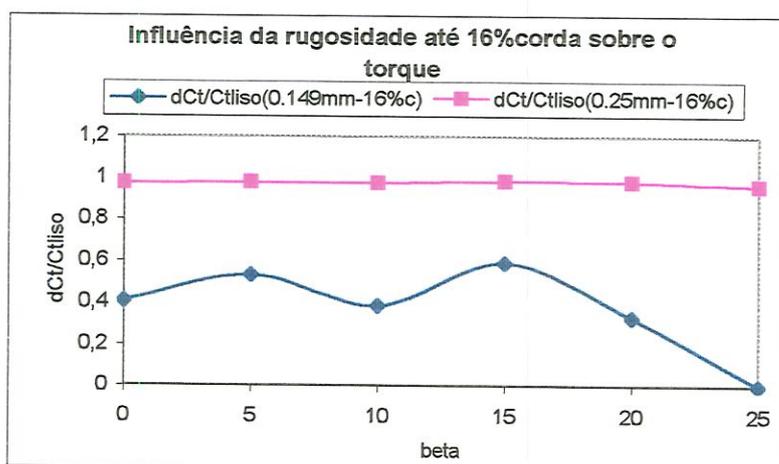


Figura 5.55 - Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 16% da corda.

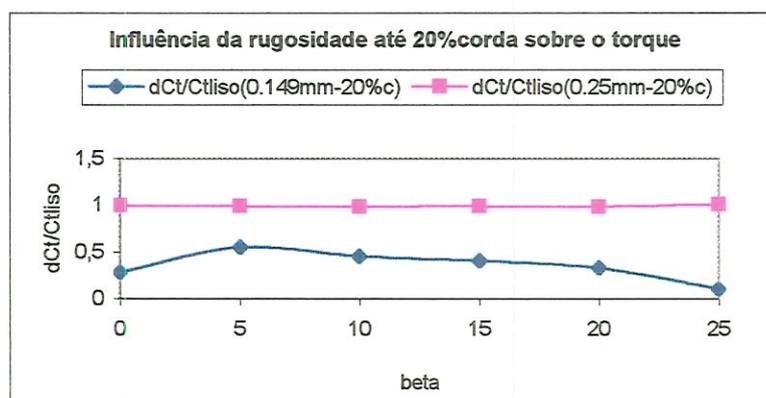


Figura 5.56 - Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 20% da corda.

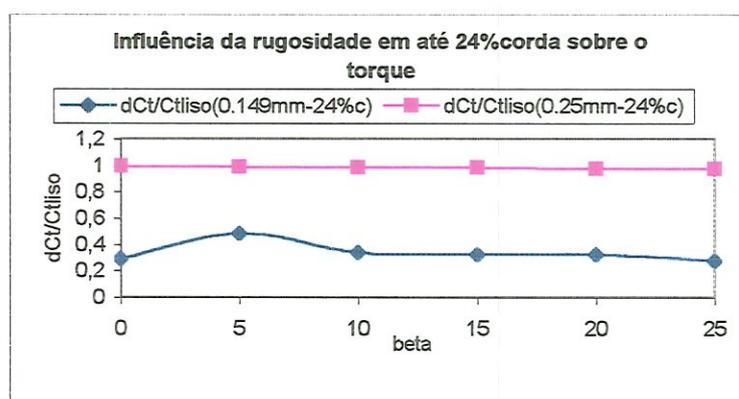


Figura 5.57 - Variação de torque gerado considerando duas rugosidades adotadas (0.149mm e 0.25mm) na faixa de 24% da corda.

b) Análise considerando a rugosidade e os ângulos de passo

A turbina também foi testada quanto ao ângulo ótimo de passo e sua conseqüente sensibilidade à rugosidade. As curvas obtidas e mostradas nas FIGURAS 5.58 a 5.65 servem como base para esta análise.

Para uma visualização comparativa das configurações adotadas, o conjunto de curvas mostrado nas FIGURAS 5.58 e 5.59 apresentam os casos agrupados de acordo com o tamanho de grão, a serem analisados separadamente a seguir.

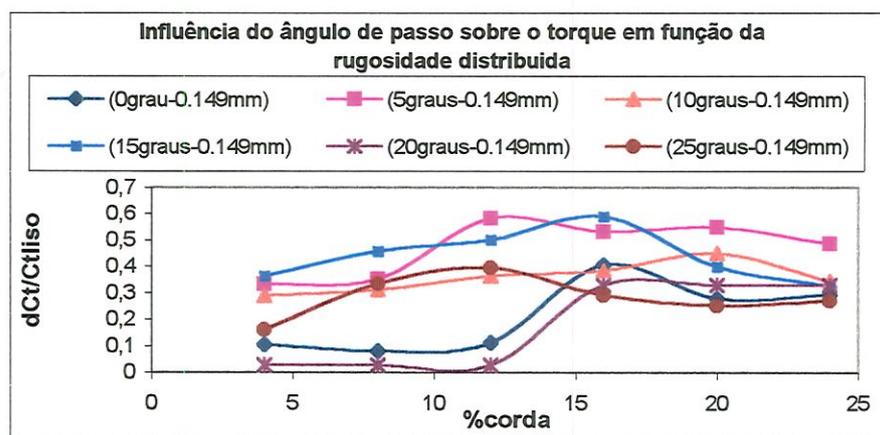


Figura 5.58 - Influência da rugosidade de 0.149mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque.

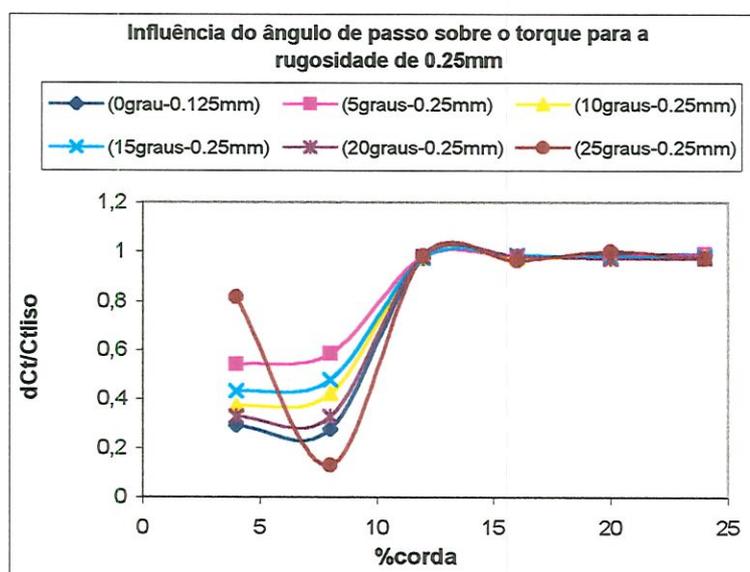


Figura 5.59 - Influência da rugosidade de 0.25mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque.

De acordo com a FIGURA 5.60, considerando o rotor montado e funcionando com um ângulo de passo de 0 grau, a perda de torque (10%) foi menor para a pá com a rugosidade numa faixa menor da corda, do que com a outra rugosidade que apresentou uma perda de 29%; mesmo considerando os outros ângulos de passo, observou-se um comportamento análogo entre ambos, chegando a atingir uma diferença maior para a faixa de rugosidade em

12% da corda (97% para a rugosidade de 0.25mm e 11% para a rugosidade de 0.149mm).

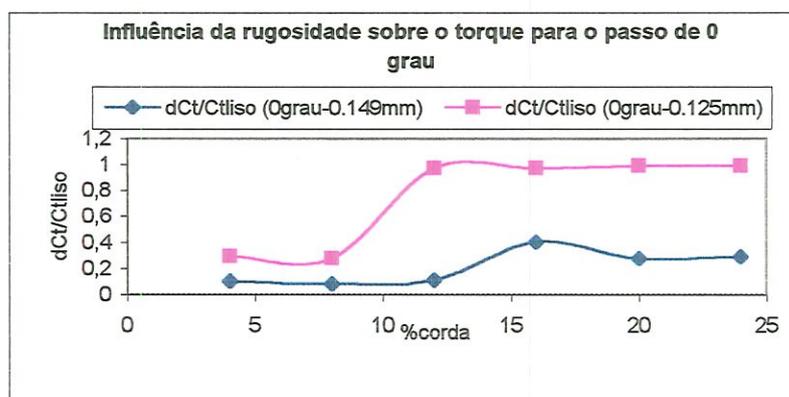


Figura 5.60 - Influência da rugosidade de 0.25mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 0 grau.

Considerando o caso seguinte (ângulo de passo de 5 graus) observou-se que a diferença de perda entre as duas rugosidades diminuiu significativamente a partir da faixa de 12% da corda, quando a perda de torque registrado “proporcionalmente” foi maior para o tamanho de grão menor, ou seja, enquanto a perda de torque se manteve em torno de 98% para a rugosidade maior, a perda de torque com a rugosidade menor aumentou de 11% para 58%, aproximadamente. Por outro lado, a partir da faixa de 16% da corda, os níveis de perda se mantiveram praticamente constantes, para este ângulo de passo.

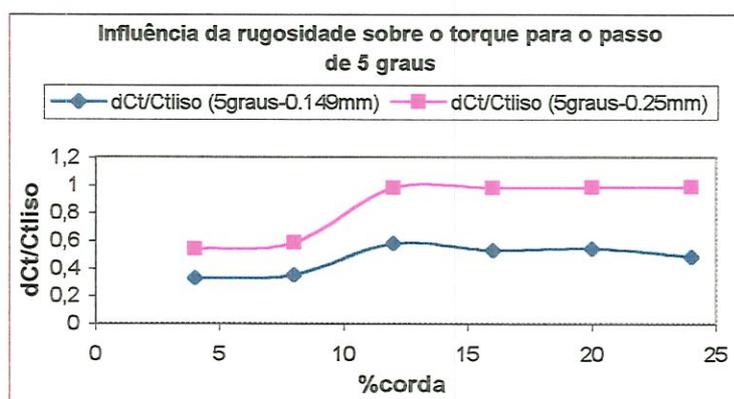


Figura 5.61 - Influência da rugosidade de 0.25mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 5 graus.

Analisando agora a variação de perda de torque para o ângulo de passo de 10 graus, é importante ressaltar que, embora as curvas apresentem numericamente valores menores para esta perda, na verdade houve um aumento de desempenho atribuído ao aumento de velocidade do fluxo, durante o ensaio com a rugosidade menor, da mesma forma ocorrido para o caso da análise de perda de potência apresentado anteriormente.

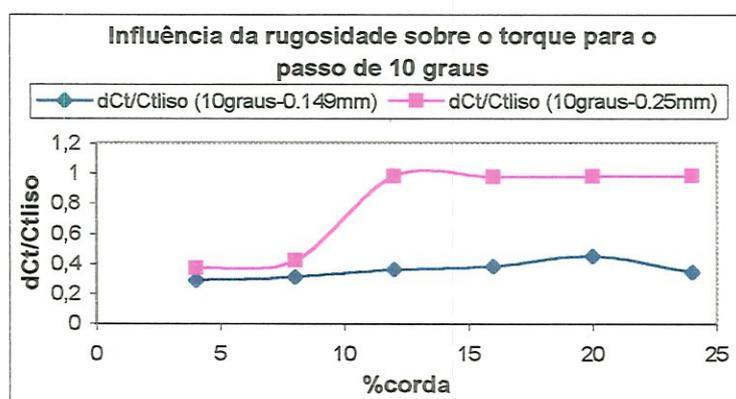


Figura 5.62 - Influência da rugosidade de 0.25mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 10 graus.

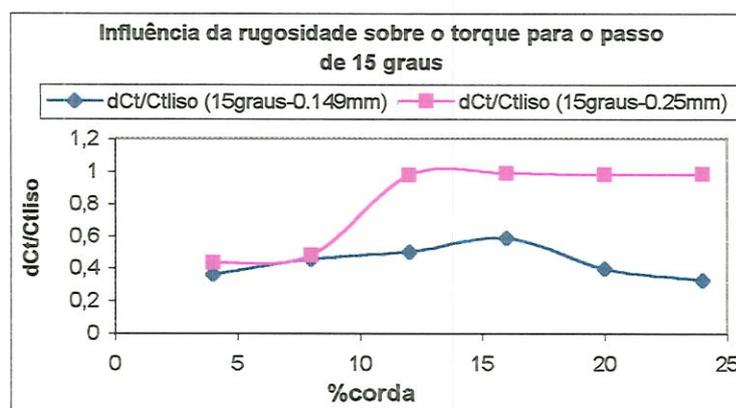


Figura 5.63 - Influência da rugosidade de 0.25mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 15 graus.

Este aumento de velocidade do fluxo gerado através do túnel de vento, também exerceu influência nos casos seguintes (FIGURAS 5.64 E 5.65), para os ângulos de passo de 20 e 25 graus, atingindo um limite

considerado, de certa forma, crítico. Nestes ângulos de configuração de passo do rotor, observou-se que houve uma geração mínima de torque e de potência.

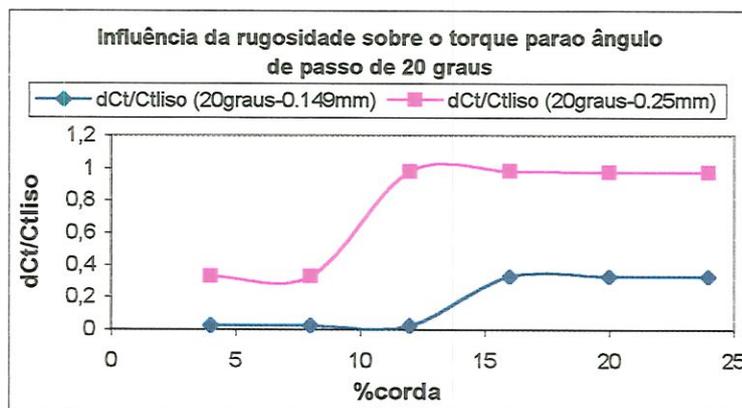


Figura 5.64- Influência da rugosidade de 0.25mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 20 graus

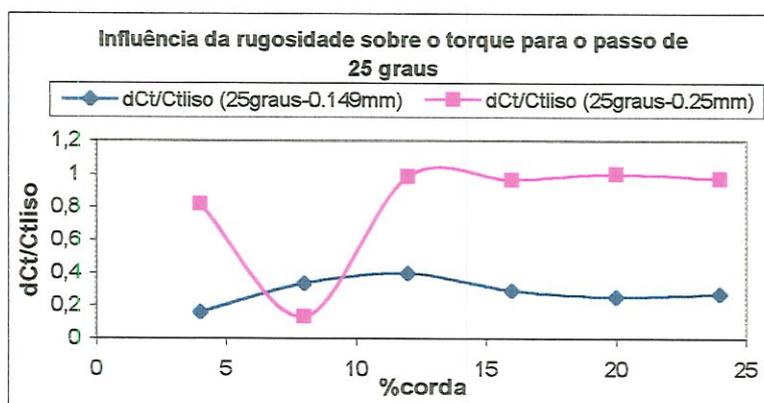


Figura 5.65 - Influência da rugosidade de 0.25mm colocada a 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24% da corda sobre a geração de torque para o passo de 25 graus

5.2.2 - Ensaio de transição da camada limite sobre as pás do rotor girando

Utilizou-se a nossa técnica de sublimação para a visualização da transição da camada limite sobre a superfície da pá dentro da câmara de ensaio do túnel de vento, também foi feito um ensaio semelhante, considerando, neste caso, o rotor em funcionamento. A posição da transição da camada limite laminar para turbulenta foi analisada através de curvas plotadas com a posição percentual da corda, onde ocorreu a transição, em função de posições percentuais do raio da pá, como mostram as FIGURAS 5.66 a 5.75, levantadas para vários ângulos de ataque, (α).

Uma vez fixado o ângulo de passo da pá, (β), calculou-se o ângulo de ataque, (α), equivalente. Assim, foi possível estabelecer uma comparação entre os dados levantados com a pá parada e com as pás do rotor em funcionamento.

Deve-se ressaltar que este ângulo de ataque, quando o rotor está em funcionamento, varia de acordo com a posição radial. Estes resultados comprovam que turbinas eólicas de eixo horizontal trabalham em ângulos de ataque altos nas regiões próximas à raiz.

Enquanto a faixa de ângulos de ataque no ensaio com a pá parada foi de 0 a 16 graus, no caso girando, esta faixa de ângulos de ataque foi mais ampla, de - 6 (na ponta) a 14 graus (na raiz).

Considerando inicialmente a posição a 10% do raio da pá, conforme apresentado na FIGURA 5.66, onde o ângulo de ataque da pá girando variou entre 11 e 14 graus, observou-se que a transição ocorreu antes para o caso parado do que no caso como rotor. A mesma tendência pode ser observada para o caso com o rotor girando, a 20% do raio, conforme apresentado na FIGURA 5.67.

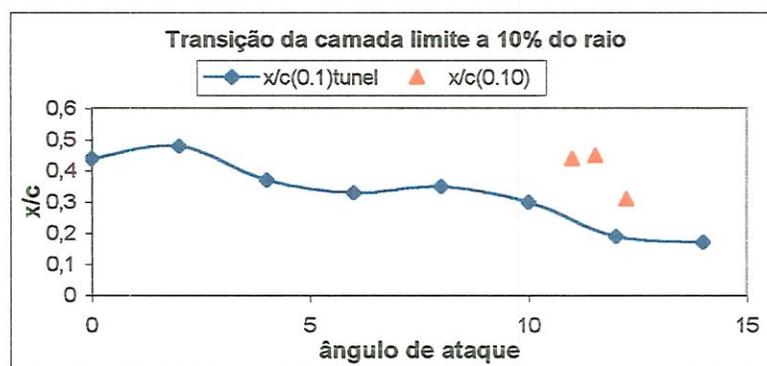


FIGURA 5.66 – Local da transição da camada limite em relação a corda a 10% do raio da pá.

Apesar de os efeitos da rotação serem maiores na ponta da pá, observa-se de resultados anteriores (WOOD D.H., 1991) que o estol é amenizado na parte da pá próxima à raiz. O resultado das FIGURAS 5.66 e 5.67 apontam para uma extensão maior de camada limite laminar nesta região o que pode confirmar o atraso na separação da parte turbulenta, pois a camada limite laminar só se sustentará se o gradiente de pressão for favorável. Este gradiente favorável de pressão pode ter sido resultado da rotação. Deve-se ressaltar que os testes foram restritos (pequena variação de α) e que não foram utilizadas técnicas de visualização da separação da camada limite turbulenta. Além disso seria necessário o levantamento da distribuição de pressão ao longo da corda para observar o gradiente de pressão. Resultados anteriores confirmam que, com a pá girando, o gradiente de pressão é aliviado na raiz.

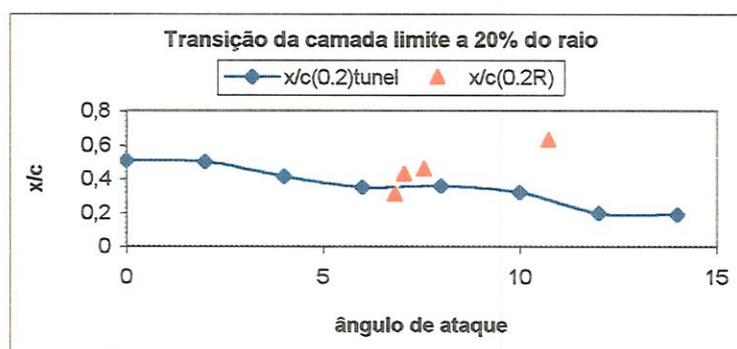


FIGURA 5.67 – Local da transição da camada limite em relação a corda a 20% do raio da pá.

Até 20% do raio, conforme observado anteriormente, a pá, no caso em que o rotor estava girando, apresentou uma faixa mais ampla de camada limite laminar a que pode ser, explicado pelo fato de os efeitos tridimensionais e de rotação são menores na raiz do que na ponta.

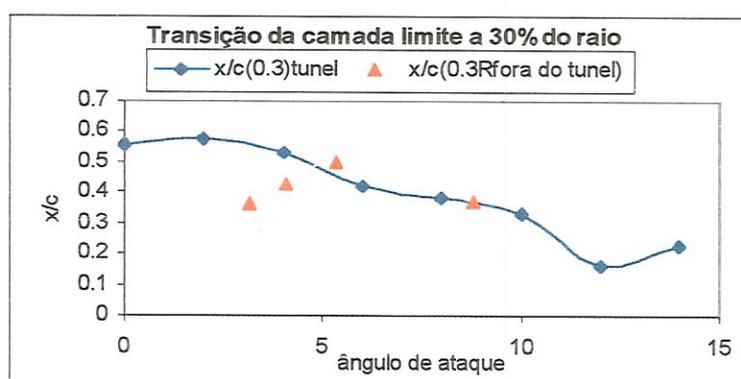


FIGURA 5.68 – Local da transição da camada limite em relação a corda a 30% do raio da pá.

Prosseguindo com a análise da transição ao longo de todo o raio da pá, observou-se que em torno de 30 a 40% do raio a tendência anterior começou a se inverter, conforme pode ser visto nas FIGURAS 5.68 e 5.69.

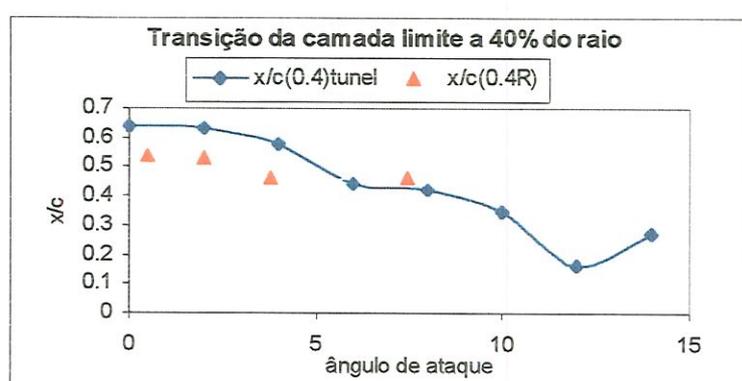


FIGURA 5.69 – Local da transição da camada limite em relação a corda a 40% do raio da pá.

Para r/R maiores, com a pá girando, em ângulos de ataques menores, a transição ocorreu em posições da corda inferiores, comparados ao caso da pá parada dentro do túnel (FIGURA 5.69). Em posições médias da pá, em torno de 40 e 50% do raio (FIGURAS 5.69 e 5.70), esta inversão é mais evidente, uma vez que, a partir desta região, os efeitos são mais intensos, promovendo desta forma, transição da camada limite laminar para turbulenta, mais cedo.

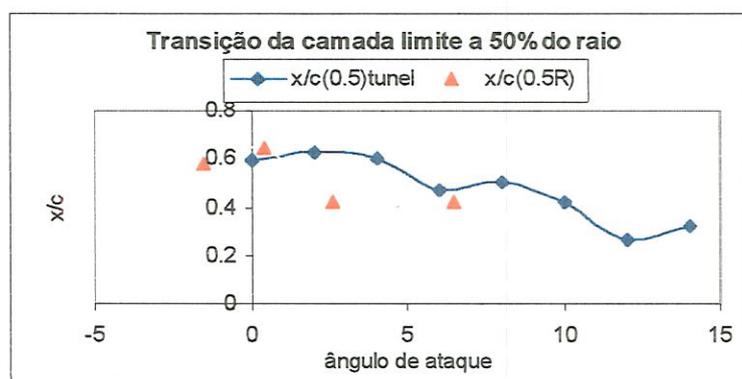


FIGURA 5.70 – Local da transição da camada limite em relação a corda a 50% do raio da pá.

Além da região média da pá, quando os ângulos de ataque passam a ser negativos, a tendência de transição ocorrer mais cedo do que no caso parado continuou, conforme mostram as FIGURAS 5.71 e 5.72.

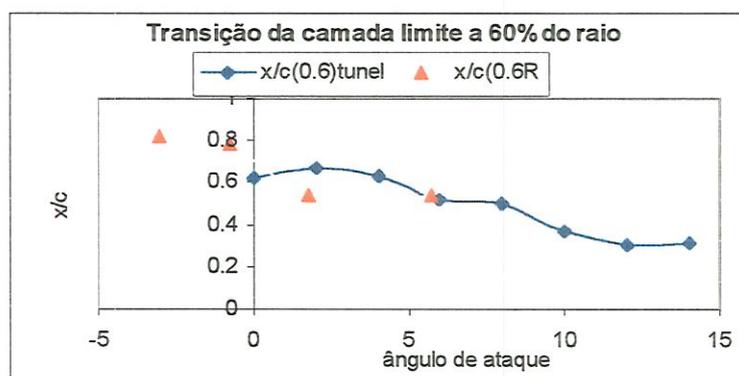


FIGURA 5.71 – Local da transição da camada limite em relação a corda a 60% do raio da pá.

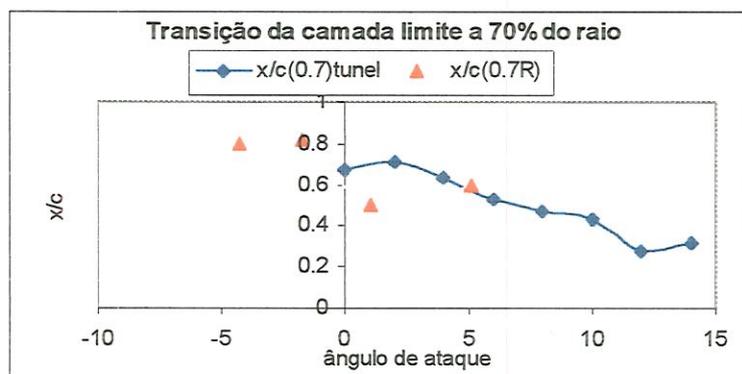


FIGURA 5.72 – Local da transição da camada limite em relação a corda a 70% do raio da pá.

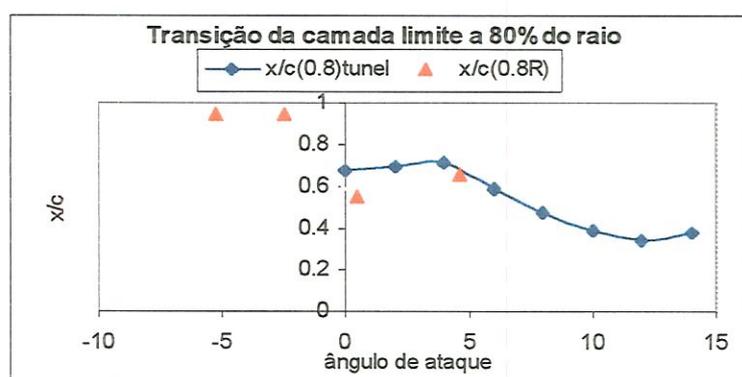


FIGURA 5.73 – Local da transição da camada limite em relação a corda a 80% do raio da pá.

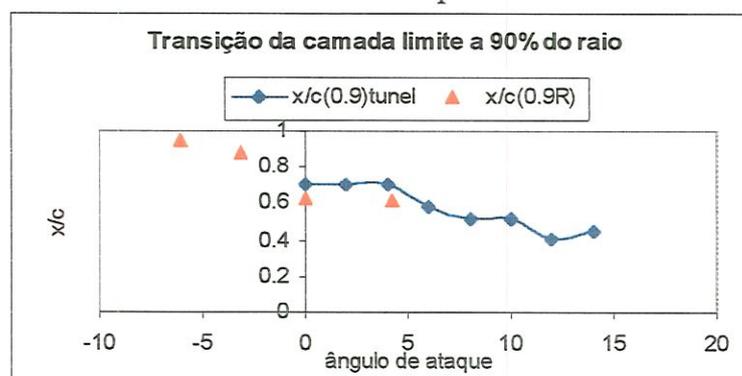


FIGURA 5.74 – Local da transição da camada limite em relação a corda a 90% do raio da pá.

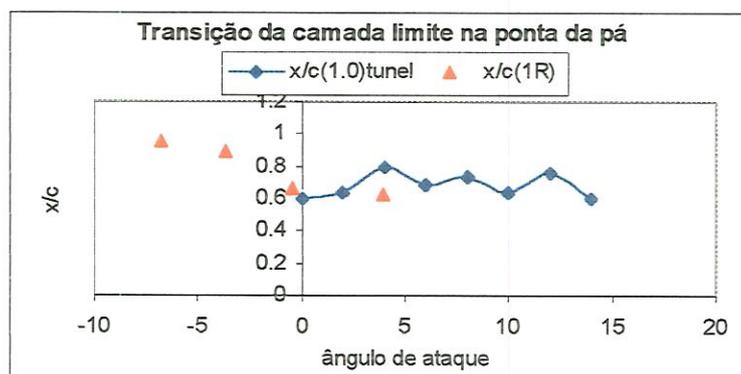


FIGURA 5.75 – Local da transição da camada limite em relação a corda a 100% do raio da pá.

Nas FIGURAS 5.76 e 5.77 mostram como foram obtidas as frentes de transição usando-se a técnica de sublimação com naftaleno. Pode-se notar também o efeito de alguns grãos maiores de naftaleno que induziram transição.

Este efeito é muito interessante, pois confirma que pequenos encrustamentos na superfície da pá podem provocar transição da camada limite, e conseqüente perda de desempenho aerodinâmico local. Na FIGURA 5.76 pode-se notar outro fenômeno interessante: o encrustamento de naftaleno, nº 1, naquela posição não foi suficiente para provocar transição, mas logo a seguir o nº 2 o foi. Isso indica que para cada condição e seção da pá há uma altura e posição de rugosidade mínima para que esta induz transição.

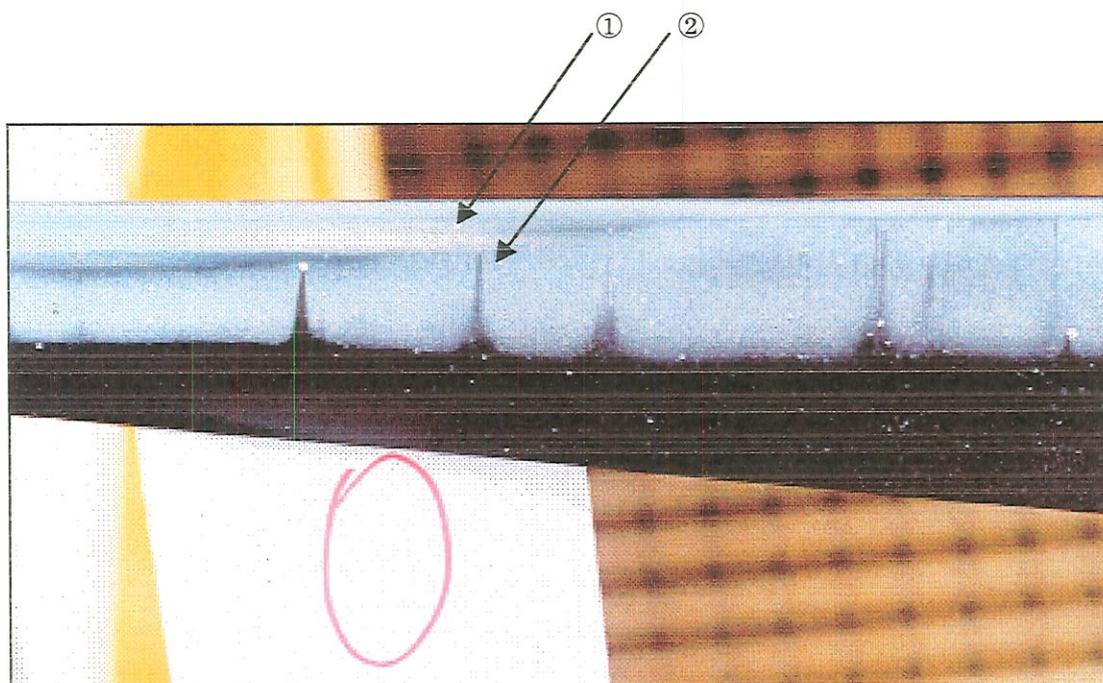


FIGURA 5.76 – Imagem de uma pequena partícula de arrasto provocando a transição prematura da camada limite.

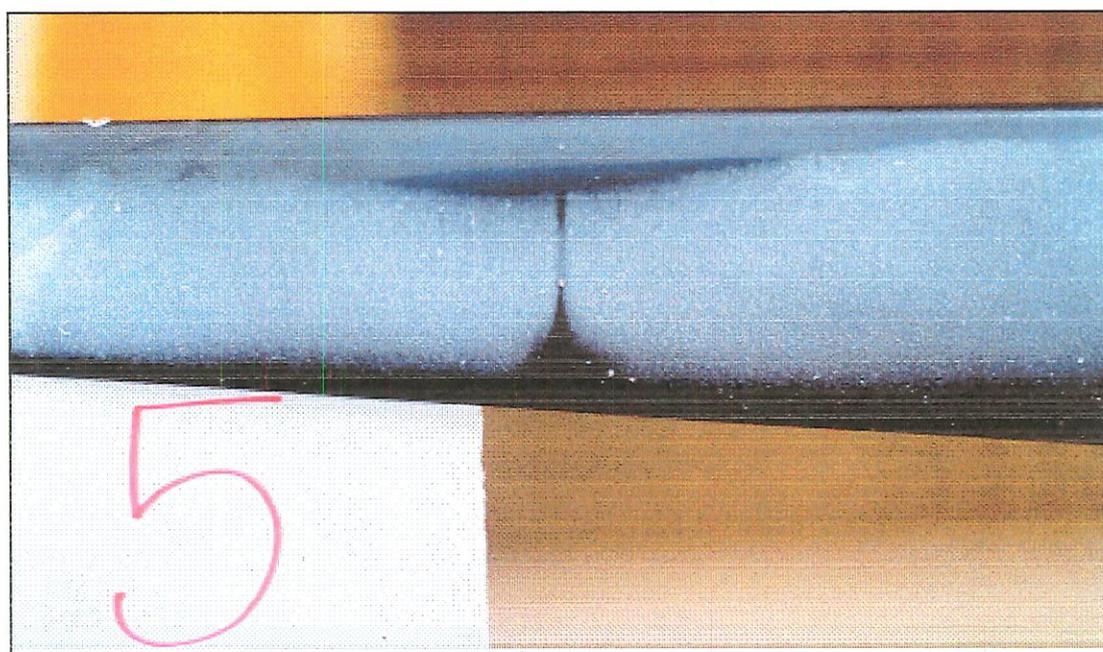


FIGURA 5.77 – Imagem de um ponto de descolamento sem ocorrência da transição.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 – Conclusões

Os resultados obtidos permitiram uma conclusão da pesquisa, dentro do objetivo proposto de apresentar uma análise sobre o desempenho de um modelo de turbina projetada, sob o ponto de vista aerodinâmico, em presença de rugosidade.

Quanto ao método de visualização do escoamento aqui adotado, este pode ser extrapolado para um caso real, cujo número de Reynolds seja significativamente maior, podendo assim, apresentar informações adicionais as aqui apresentadas. No entanto, pode ser concluído neste trabalho que o escoamento sobre o perfil apresenta uma extensão laminar considerável.

Outro aspecto a ser focado neste trabalho, é quanto ao comportamento apresentado pelas turbinas sob o efeito da sujeira e incrustação de insetos (rugosidade), que naturalmente ocorre em pás de turbinas eólicas, comprometendo o seu desempenho, de forma a causar prejuízos quanto ao seu

funcionamento e manutenção. A quantificação desse prejuízo pode ajudar no planejamento de implantação e/ou manutenção de sistemas eólicos dessa natureza.

Assim, a sensibilidade do modelo, quanto a influência da sujeira e incrustação de insetos, foi simulada através da utilização de areia com tamanhos de grãos diferentes (0.149mm-0.25mm), aplicada numa faixa do bordo de ataque, ao longo da corda e do raio da pá.

Até aproximadamente 4% da corda, a perda de potência gerada pela turbina foi de 22% para um tamanho de grão de 0.149mm. Para um tamanho de grão maior (0.25mm), observou-se que não houve um aumento significativo dessa perda, que foi de 25%.

À medida que a rugosidade foi colocada numa faixa mais ampla ao longo da corda, percebeu-se visivelmente que a perda aumentou até 46%, no grão menor; e atingiu valores de até 100% de perda quando considerando os grãos eram maiores.

Este trabalho, tendo utilizado perfis específicos para o uso eólico, cujas características principais ligadas a esta pesquisa é a baixa sensibilidade à rugosidade, vem apresentar de forma quantitativa até que ponto a presença da rugosidade compromete o desempenho das turbinas eólicas.

Com relação ao perfil, nota-se que, na região aonde tal perfil aerodinâmico possui concavidade parte traseira, devido ao gradiente de pressão adverso nesta região, a transição ocorreu mais cedo. Este efeito é ainda maior nesta região de concavidade, para pequenos ângulos de ataque, podendo, inclusive, ocorrer separação. Por esta razão é que se utilizam, geralmente, esses tipos de perfis em regiões da pá que operam a altos ângulos de ataque e baixa velocidade. Nota-se ainda que o tipo de perfil influencia, sobremaneira, na posição da transição; uma asa com um mesmo perfil ao longo da envergadura tenderia a apresentar uma faixa constante de escoamento laminar.

Dessa forma, a análise aqui levantada leva a conclusão de que uma limpeza freqüente e efetiva das pás do rotor ainda é a melhor forma de garantir um alto desempenho aerodinâmico.

Porém, quando tal limpeza torna-se inviável do ponto de vista econômico, pode ser feita num intervalo de tempo maior, sem grande comprometimento da turbina. Quando a sujeira apresentada, mesmo numa ampla faixa da corda, é de grãos pequenos, a perda de potência pode ser aceitável; por outro lado, se este grão for grande (o que representa uma rugosidade intensa), o funcionamento fica comprometido.

Como a rugosidade natural é, comprovadamente, difícil de ser reproduzida em laboratório, a contribuição do experimento é no sentido de apresentar uma tendência, não tendo condições de apresentar uma conclusão definitiva.

Levando em consideração que em até 4% da corda não houve grandes perdas, a limpeza pode ter sua periodicidade aumentada, indicando ao responsável por uma dada turbina, a determinação das características específicas para cada caso, uma vez que os fenômenos naturalmente apresentados são de natureza estocástica.

Esta análise pode contribuir para implantação de sistemas eólicos, para geração de energia elétrica, de forma mais econômica.

6.2 – Sugestões

Sugere-se que:

- Seja feita uma comparação com outras turbinas que utilizem outros tipos de perfis, para se ter constatação do melhor rendimento destes perfis aplicados

a este tipo de turbina, conforme BJÖRCK(1989), considerando as condições de vento brasileiras;

- Se faça uma análise utilizando ensaios de visualização, onde estes possam ser extrapolados para um caso real, cujo número de Reynolds é significativamente maior;
- Assim como foi feito para a pá parada, as medidas de forças de sustentação e arrasto sejam feitas para o caso quando o rotor está em funcionamento, principalmente nas regiões pós estol.

BIBLIOGRAFIA

_____, dezembro, 1986 “Otimização de Sistemas eólicos de bombamento d’água (bombas de deslocamento positivo)”. CNPq – Programa do Tópico do Semi-árido, Núcleo de Energia – UFPB – campus II.

ABBOT, I. H. VON DOENHOFF, A. E. and STIVERS, L. S. (1945) Summary of Airfoil Data. NACA Report 824.

ABBOT, I.H. and DOENHOFF, A.E.V. “Theory of wing sections”. General Publishing Company Ltd. New York. 1949.

ALVES, A. S. G. “Análise do desempenho de rotores eólicos de eixo horizontal”, dissertação de mestrado, UFPA, Belém. 1994.

ANDERSON Jr., J.D. “Fundamentals of Aerodynamics”, 2ª edição, McGraw-Hill, New York. 1991.

ARRIETA, H.V. , PARDO,E. and PRADO,R.A. “Diseño de las palas para una turbina eolica de eje horizontal”, Anais do VI Congresso Nacional de Ingenieria Mecánica. Chile. 1994.

BANNISTER, W.S. , “A Pneumatic Method of Rotacional Speed Control of Horizontal Axis Wind Turbines”, EWEC’89., 1989.

BANNISTER, W.S., “An investigation into the use of boundary layer control as a method of overspeed prevention for vertical axis wind turbine”. Proceedings of 7th BWEA wind energy workshop, março, 1985.

BANNISTER, W.S., “Pneumatic spoilers for regulation and control of wind turbines”.Delphi workshop on wind energy application. Greece, May, 1985a.

BELLO, E.M. , “Um sistema de controle eletrônico-transistorizado de velocidade de motor de corrente contínua de excitação independente”. Dissertação de Mestrado, USP-EESC, São Carlos, 1982.

BETZ, A. “Naturwissenschaften”, XV, 905-914.1927.

BILAU, A. “Elektrotech. Z.”, 46, 1405-1407, 1925.

BJORCK, Anders. “Airfoil design for variable RPM horizontal axis wind turbines”. Proceedings of AMSTERDAM EWEC’89, 1989

BJÖRCK, Anders. “Coordinates and Calculations for the FFA-W1-xxx, FFA-W2-xxx e FFA-W3-xxx series of airfoils for horizontal axis wind turbines, FFA TN 1990, Stockholm, 1990.

BRAGG, M.B. and GREGOREK,G.M., Environmentally Induced Surface Roughness Effects on Laminar Flow Airfoils: Implications for Flight

Safety". Proceedings of AIAA, Aircraft Design, Systems and Operations Conference, Seattle, USA, 1989.

BRAND, A.J. et alli, "Field Rotor aerodynamics: The rotating case". American Institute of Aeronautics and Astronautics. 35th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, January 6-10, Reno, ASME International, 1997.

BUTTERFIELD, C. P.(Sandy). "Three dimensional airfoil performance measurements on a rotating wing". Proceedings of AMSTERDAM EWEC'89,1989.

BUTTERFIELD, C.P., MUSIAL,W.P., SCOTT,G.N. e SIMMS,D.A., "NREL combined experiment final report – phaseII, National Renewable Energy Laboratory –NREL, Report NREL/TP-442-4207,1992.

CATALANO, F. M., "Projeto, Construção e Calibração de um túnel aerodinâmico de circuito aberto tipo N.P.L de seção transversal hexagonal". Dissertação de mestrado, EESC-USP, 1988.

CIAPPA, M.B. and SÁNCHEZ, L.C., "Diseño y construccion del sistema aerodinamico de uma turbina eolica de eje horizontal, de baja potencia". Anais do VI Congresso Nacional de Ingenieria Mecánica, Chile, 1994.

DAHLBERG, Jan-Ake et al, "Wind tunnel measurements of load variations for yawed wind turbine with different hub configurations". EWEC'89, 1989.

DAVIDSON, C.J. , "The experimental investigation of the effects of roughness upon aerofoil characteristics at low Reynolds Numbers", M.Sc. Thesis, Cranfield Institute of Technology, College of Aeronautics, september, 1985.

- DURAND, W. F. , "Aerodynamics Theory", USA, Stanford University, 1934.
- DYMENT, A., "A modified form of the Betz' wind turbine theory including losses", Journal of Fluids Engineering, pag.356-358, 111(1989).
- EGGLESTON, D. M. and STODDARD, F. S. , "Wind Turbine Engineering Design", New York, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1987.
- EPPLER, R. , "Airfoil Design and Data", Springer-Verlag, 1990.
- FEITOSA, E.A.N. and MEAD, D.J., "Parametric Resonance in Horizontal Axis Wind Turbines", EWEC'89, 1989.
- FOLLINGS, F.J., "Hand book wind data for wind turbine design". EWEC, Amsterdam, 1989.
- FOX, Robert W. e McDONALD, Alan T. "Introdução à Mecânica dos Fluidos". 4a. edição. Ed. Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro, 1995.
- GAD-el-HAK, MOHAMED. , "Control of Low-Speed Airfoil Aerodynamics". AIAA Journal, vol.28, Nº 9, University of Notre Dame, Indiana, 1990.
- GEMERT, P.H. van et al., "One year operation of a collective wind turbine combined with a biogas plant", EWEC'89, 1989.
- GESSOW, A. and GARRY, C. M., "Aerodynamics of the Helicopter". The Macmillan Company, New York, 1952.
- GIGUÈRE, P. and SELIG, M. S. , "Desirable Airfoil Characteristics for Large Variable-Speed Horizontal Axis Wind Turbines", Journal of Solar Energy Engineering, August, vol. 119, 1997.

GLAUERT, H. "Airplane propellers in Aerodynamic Theory". (Ed. W. F. Durand), vol.4, Springer, New York, 1935.

GOLDING, E. W. "The Generation of Electricity by Wind Power". E. & F. N. Spon Ltd. London, 1976.

HAGG, F. and DELFT, D.R. van, "Design Process from site data until built turbine", EWEC'89.

HANSEN, A.C. , "Aerodynamics Damping of Blade Flap Motions at High Angles of Attack". Journal of Solar Energy Engineering, vol. 117, pag. 194-199, Agosto, 1995.

HASSAN, U. et al. , "A wind tunnel investigation of the wake structure and machine loads within small wind turbines farm". Proceedings of the twelfth BWEA Wind Energy Conference. Edited by T.D. Davies, J.A. Halliday e J.P. Palutikof, 1990.

HEMON, Pascal; OLIVARI, Domenico e WURMSER, Martin. "Experimental investigation of horizontal axis wind turbine dynamic stall in wind tunnel". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 39(1992) 73-82. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam,1992.

HEMON, Pascal; OLIVARI, Domenico e WURMSER, Martin. "Experimental investigation of horizontal axis wind turbine dynamic stall in wind tunnel". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 39(1992) 73-82. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam,1992.

HILL, D.C. and GARRAD, A.D. "Design of aerofoils for wind turbine use". Wind Energy: Technology and Implementation. Proceedings of Amsterdam EWEC'89, Garrad Hassan and Partners Bristol, 1989.

HIMMELSKAMP, H., "Max-Planck Institute for Fluid Dynamics, Göttingen, Report N°2, 1950.

HIRATA, M.H. et alli., "Projeto e construção de unidade eólica de 3.2m de diâmetro". III Congresso Brasileiro de Energia, Anais, Proceedings, Rio de Janeiro, 1984.

HOUGHTON, E. L. and CARRUTHERS, N.B. "Aerodynamics for Engineering Students". Third Edition. Ed. Edward Arnold. Inglaterra, 1982.

INGLIS, D.R. "A windmill's theoretical maximum extraction of power from the wind". American Journal of Physics, n° 47, pags.416-420, Maio, 1979.

JACKSON, K.L. and D. M. SOMERS. "Advanced Airfoils for Hawts", Proceedings, Wind Power'87 Conference, SERI/CP-217-3315, Washington, DC: American Wind Energy Association, pp. 106-111. 1987.

JAMIESON, P. and RAWLINSON-SMITH, R. (1994) "High Life Aerofoils for Horizontal Axis Wind Turbines" British Wind Energy Association (BWEA) 16 Conference, Stirling, England. 1994.

JANSEN, W.A.M. and SMULDERS, P.T., "Conception des Pales des éolienne a axe horizontal", SWD80-1, 1980.

KARAOLIS, N.M. et alli., "Composite wind turbine blades: coupling effects and rotor aerodynamic performance". University of Reading, UK, EWEC, Amsterdam, 1989.

KENTFIELD, J.A.C. "Theoretically and Experimentally obtained performances of Gurney-flap equipped wind turbines". Wind Engineering, vol.18, No2,1994.

KLIMAS, P.C., SLADKY, J.F., "Vertical axis wind turbine regulation through centrifugally pumped lift spoiling", Sandia National Laboratories, Albuquerque, USA, 1985.

Le GOURIÈRES, Désiré. "Energie Eolienne - Théorie, conception et calcul pratique des installations". Editions Eyrolles, Segunda edição, Paris, 1980.

LEITHEAD, W.E. et al. , "Simulation of wind turbines by simple models", EWEC'89. 1989.

LISSAMAN, P.B.S. "Wind Turbine Aierfoils and Rotor Wakes, in Spera, D.A Wing Turbine Techology", ASME Press. Cap. 6. 1994.

MADSEN, H.A., "Aerodynamics of a horizontal-axis wind turbine in natural conditions". Riso National Laboratory, Report M-2903, 1991.

MEDEIROS, Armando et alli., "Modelagem aerodinâmica de turbinas eólicas de passo variável", ABCM, VI ENCIT, Florianópolis, Brasil, 1996.

MERRIAN, MARAHAL F., "Wind Energy for Human Needs", United Nations Environment Programme I. H. Usmani, Senior Energy Advisor, [Ministério da Ciência e Tecnologia – PETROBRAS/CENPES], 1974.

MILBORROW, D.J., "Changes in airfoil characteristics due to radial flow on rotating blades", Proceedings of 7th BWEA Conference, 1985.

MILEY, J. "A Catalog of Low Reynolds Number Airfoils", Annual Review of Fluid Mechanics, pp. 223.239. 1982.

MULJADI, E., BUTTERFIELD, C. P. and MIGLIORE, P., "Variable Speed Operation of Generators with Rotor-Speed Feedback in Wind Power Application", Journal of Solar Engineering, ASME, vol. 118, n° 4, Novembre, 1996.

MUSIAL, W. D.; BUTTERFIELD, C. P. and JENKS, M. D. "A comparison of two- and three dimensional S809 airfoil properties for rough and smooth HAWT rotor operation. Annual Energy Source Technology Conference and Exhibition, 30. ASME, New York, 1990.

MUSIAL, W.D., BUTTERFIELD, C.P. and JENKS, M.D. , "A comparison of two- and three-dimensional S809 airfoil properties for rough and smooth HAWT rotor operation". ASME, New York, 1990.

OSTOWARI, C. and NAIK, D. "Post-Stall Wind Turbine Studies of Varying Aspect Ratio Wing Tunnel Blades with NACA 44xx Series Airfoil Sections". Golden, Colorado, National Renewable Energy Laboratory. 1984.

PANKHURST, R. C. and HOLDER, D. W., "Wind-tunnel technique (na account of experimental methods in low- and high speed wind tunnels)". Sir Isaac Pitman & Sons Ltd., London, 1968.

PAULSEN, U. S. "Aerodynamics of a "Full-scale, non Rotating Wind Turbine Blade under Natural Wind Conditions". AMSTERDAM EWEC'89,1989.

PEARCY, H. H., "Some Effects of Shock-Induced Separation of Turbulent Boundary-Layers in Transonic Flow Past Airfoils". Proc. Symposium at National Physical Laboratory, 1955.

PÉREZ, H.O. and CALISTO, M.S., "Optimizacion del aprovechamiento de energia eolica com rotores de eje horizontal", Anais do VI Congresso Nacional de Ingenieria Mecánica. Chile,1994.

PFLEIDERER, C. and PETERMANN, "Máquinas de Fluxo". Livros Técnicos e Científicos Editora S.A , São Paulo, 1979.

POPER, A. and HARPER, J.J., "Low speed wind tunnel testing", John Wiley&Sons, New York,1966.

PRADO, Ricardo A. "Reformulation of the momentum theory applied to wind turbines". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Elsevier Science, dezembro,1995.

PUTNAM, Palmer C. "Power from the Wind". D. van NOSTRAND COMPANY, Inc. London, 1948.

RAPSON, J. E. and GRAINGER,W. , "High reliability wind turbine systems". EWEC'89. 1989.

RODRIGUES, A.H. , PINHO, F.T. and RESTIVO, A., Proceedings of EWEC'88, pp. 235-240, Herning, Denmark, 1988.

RODRIGUES, A.H. and RESTIVO, A., "Wind tunnel study of the conversion efficiency of a wind turbine". EWEC'89, 1989.

RONSTEN, G. ; DEXIN, He et alli. "Pressure Measurements on a 5.35m HAWT in CARDC 12*16m Wind Tunnel Compared to Theoretical Pressure Distributions". Proceedings of AMSTERDAM EWEC'89,1989.

RONSTEN, Göran. "Static Pressure measurements on a rotating and non-rotating 2.375m Wind Turbine Blade - Comparison with 2D Calculation". Proceedings of AMSTERDAM EWEC'89,1989.

SATCHWELL, C.J. and TURNOCK, S.R., "Structurally-efficient aerofoils for wind turbines". EWEC. Amsterdam. 1989.

SELIG, S. M. and TANGLER, J. L., "Development and Application of a Multipoint Inverse Design Method for Horizontal Axis Wind Turbines". Journal of Wind Engineering, vol.19, N^o 2, pag. 91-105, 1995.

SERRA, M. F. G. and SCHOOR, M.C. "Aeroelastic Tailoring of a Horizontal Axis Wind Turbines". Wind Engineering Journal, vol.19, No.4, 1995.

SILVA, S. ROCHA and ARAÚJO, T. S. de, "Modelagem de uma Turbina Eólica de Passo Variável", Tese de Doutorado (UFPB), Campina Grande, 1991.

SIMÕES, F. J. ,"Application of a free vortex wake model to a horizontal axis wind turbine."EWEC, 1991.

SIMÕES, F. J. and SILVA, S. R., "Determinação e modelamento das características de conversão de turbinas eólicas a partir de testes em campo

aberto”. Anais do IV Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 1989.

SCHLICHTING, H., “Boundary Layer Theory”, 7th ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1974.

SOMERS, D. M. and TANGLER, J. L., “Wind Tunnel test of the S814 thick root airfoil”, *Journal of Solar Engineering, ASME*, vol. 118, nº 4, Novembro, 1996.

STEPNIEWSKI, W.Z., “Basic Theories of Rotor Aerodynamics”, Vol. I, Cap. III, Dover Publications, Inc., New York, 1984

STONER, Carol H. “A produção da sua própria energia” - parte I - Manual Prático de Energias Renováveis. Coleção Novas Energias. Edições CETOP, 1971.

TANGLER, J.L. and D. M. SOMERS. “Advanced Airfoils for Hawts”, *Proceedings Wing Power '85 Conference, SERI/CP-217-2902*, Washington, DC. American Wind Energy Association, pp. 45-51. 1985.

TANGLER, J.L., “Comparison of wind turbine performance prediction and measurement, *Journal of Solar Energy Engeneering*, 104, 84-88, 1987.

THEODORSEN, Th. “Theory of propellers”. McGraw-Hill, New York, 1948.

THRESHER et. al. “Wind Technology Development: Large and Small Turbines”. National Renewable Energy Laboratory. http://www.nrel.gov/research/wind/wind_turbines.html, agosto, 1996.

THRESHER, R.W. and HOCK, SUSAN M. , "Wind Systems for electrical power production", Mechanical Engineering Journal, August, 1994.

TIMMER, N. and ROOY, R. van. ,"Thick airfoils for HAWT's". Wind Energy: Technology and Implementation. EWEC, Amsterdam, 1991.

TIMMER, N. and ROOY, R. van., "Airfoils". Institute for Wind Energy Research. Design and testing of wind turbine blade airfoils. nando@dutlls1.lr.tudelft.nl, agosto, 1996.

VAVRA, M.H., "Aero-thermodynamics and Flow in Turbomachines". Robert E. Krieger publishing Co., New York,1974.

VRIES, E. T., "The safety of wind energy". EWEC'89, 1989

WARNE, D. F. "Wind Power Equipment". ERA Technology Ltd. Leather head, U. K. , 1983.

WEIDNER,A.,"Flap-hinge rotor – innovative design for light-weight wind turbines", EWEC'89, 1989.

WETZEL, K. K. and FAROKHI, S. "Influence of Vortex Generators on NREL S807 Airfoil Aerodynamic. Characteristics and wind turbine performance". Wind Engineering Journal, vol.19, No3,1995.

WILSON, R. E. and LISSAMAN, P.B.S. "Applied Aerodynamics of Wind Power Machines, PB 238595. Rep. No. NSF-RA-N-74-113, NTIS, Springfield, Virginia, USA, 1974.

WOOD, D.H., "A three-dimensional analysis of stall-delay on a horizontal axis turbine". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 37, 1-14, Amsterdam, 1991.

ZHIQUAN, Ye. "Aerodynamic optimum design procedure and program for the rotor of horizontal-axis wind turbines". Proceedings of AMSTERDAM EWEC'89, 1989.

ANEXO A

Balança Aerodinâmica

A estrutura básica da balança aerodinâmica se compõe de conjuntos rígidos feitos de perfil 6"x2" e 4mm de espessura da ALCAN, em alumínio liga 65 ST4.

Cada conjunto foi maciçamente soldado, utilizando uma máquina Eutectic DinaTig-600 de solda com argônio representando uma vantagem ao minimizar problemas de distorção da estrutura devido ao aquecimento irregular.

As ferragens de fixação das lâminas das plataformas e a base da balança foram feitas de aço.

Os oito extensômetros utilizados nas lâminas foram do tipo KFG-5-120-C1-23, para alumínio, com comprimento de 5mm.

Encontra-se na página a seguir, uma fotografia da balança aerodinâmica utilizada na realização dos ensaios de sustentação e arrasto sobre a pá do modelo.

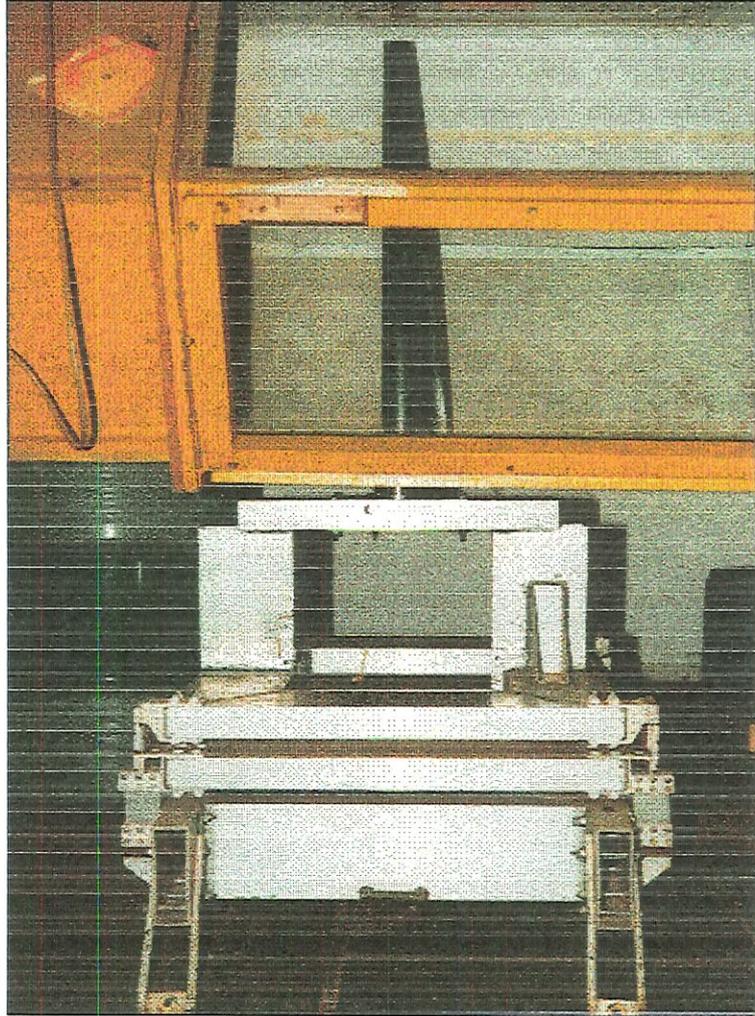


Figura 1 – Imagem da balança aerodinâmica

ANEXO B



Colméia do túnel de vento do Laboratório de Aeronaves – LAE1/USP/ESSC.

ANEXO C

Equipamentos utilizados no ensaio com a pá parada (medidas de forças):

Balança Aerodinâmica

Micro computador pentiu 200 / Placa de aquisição de dados

Manômetro de Betz

Máquina fotográfica para registro das imagens

Amplificador instrumental (leitura analógica)

Equipamentos utilizados no ensaio com o rotor girando (medidas de torque e potência):

Transdutor de torque

Fabricante: JS Sistemas mecânicos e elétricos S.A.

Tipo: dinâmico

Modelo: JS105

Capacidade: 27N.m

Freio mecânico (acionamento manual)

Gerador elétrico – dínamo automotivo

Manômetro de Betz

Tacômetro digital

Amplificador instrumental (leitura analógica)