ESTUDO DO EFEITO DA INJEÇÃO DE MASSA NA ESTEIRA DE UM CILINDRO FIXO E DE UM CILINDRO ROTATIVO

JOSÉ ANTONIO GARCIA CROCE

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

ORIENTADOR: Prof ° Dr. FERNANDO MARTINI CATALANO



SÃO CARLOS 1998

Class_	TELE-EESC
Guti	1726
Tombo_	000899

5//5 1003654

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

Croce, José Antonio Garcia Estudo do efeito da injeção de massa na esteira de um cilindro fixo e de um cilindro rotativo / José Antonio Garcia Croce. -- São Carlos, 1998. Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998. Área: Engenharia Mecânica. Orientador: Prof. Dr. Fernando Martini Catalano. 1. Corpos rombudos. 2. Efeito Magnus. 3. Redução de arrasto. 4. Injeção de massa. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Tecnólogo JOSÉ ANTONIO GARCIA CROCE

Dissertação defendida e aprovada em 16.11.1998 pela Comissão Julgadora:

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

Prof. Dr. JOSMAR DAVILSON PAGLIUSO (Eseola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Dr. M'ARCELLO AUGUSTO FARACO DE MEDEIROS (PUC – Belo Horizonte)

tof. Associado ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO Coordenador da Area de Engenharia Mecânica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Ao meu pai e minha mãe, por terem criado esta oportunidade para min

ę.

÷

Ao Professor Fernando Martini Catalano, pela oportunidade de realização deste trabalho e pela excelente orientação.

Aos meus amigos Dawson, Junior, João, Hilton, Jaqueline e Rogerio que de uma forma ou de outra contribuíram para este trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Aeronaves pelo auxílio na elaboração dos equipamentos experimentais.

Aos técnicos do Laboratório de Dinâmica que contribuíram muito para este trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Maquinas Ferramentas pelo grande auxílio.

Às secretárias da pós-graduação do Departamento de Engenharia Mecânica pela ajuda e paciência.

Ver.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1. Histórico	3
2.2. Cilindro com rotação	7
2.3. Equipamentos com cilindros com rotação	8
2.4. Redução do arrasto em corpos rombudos	14
2.5. Esteiras e Jatos bidimensionais turbulentos	17
2.6. Similaridade entre estiras e jatos bidimensional	21
2.7. Esteira bidimensional	22
2.8. Jato bidimensional	25
3. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	28
3.1. Modelo Aerodinâmico (Túnel de vento LAE-2)	28
3.2. Modelos Aerodinâmicos (Túnel de vento LAE-3)	29
3.3. Equipamento de injeção de massa	31
3.4. Medição das velocidades na esteira no túnel de vento LAE-2	32
3.5. Medição das velocidades na esteira no túnel de vento LAE-3	33
3.6. Medição da força de arrasto	34
3.7. Balança Aerodinâmica	36
3.8. Circuitos Elétricos	40
3.9. Calibração da Balança Aerodinâmica	44

3.10. Experimento de visualização	47
4. RESULTADOS	49
4.1. Características da injeção de massa	49
4.2. Distribuição de velocidade a montante do modelo	52
4.3. Dados dos ensaios com o cilindro parado (Túnel de vento LAE-2)	54
4.4. Oscilações na esteira	58
4.5. Dados dos ensaios com o cilindro rodando (Túnel de vento LAE-2)	62
4.6. Anemometria no túnel de vento LAE-3	66
4.7. Medição das forças aerodinâmicas	74
4.8. Experimento de visualização	75
4.9. Visualização com o cilindro rotativo	79
4.10. Visualização de outros corpos rombudos	84
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	87
5.1. Levantamento dos perfis de velocidade	87
5.2. Medidas de força	87
5.3. Visualização do escoamento	88
6. CONCLUSÕES	89
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	90
ANEXO A	92
A.1. Proteção de Estruturas através da injeção de massa na esteira	92
ANEXO B	97
B.1. Remodelagem do túnel de vento LAE-2	97
BIBLIOGRAFIA	101

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 -	Esquema dos aparatos usados por Magnus	6
FIGURA 02 -	Navio propelido por Rotores Flettner	9
FIGURA 03 -	Aeronave experimental com cilindros rodando	10
FIGURA 04 -	Modelo de gerador eólico usando cilindros rotativos	11
FIGURA 05 -	Concepção artística do dirigível de Van Dunsen	12
FIGURA 06 -	Características de um jato real	26
FIGURA 07 -	Esquema do modelo com suas partes principais	29
FIGURA 08 -	Vista do modelo montado na câmara de ensaio	29
FIGURA 09 -	Modelos usados nos ensaios no túnel LAE3	30
FIGURA 10 -	Sistema de injeção de massa	31
FIGURA 11 -	Anemometria no túnel de vento LAE-2	32
FIGURA 12 -	Montagem do ensaio de anemometria no túnel LAE-3	34
FIGURA 13 -	Sistema de suporte do modelo aerodinâmico	35
FIGURA 14 -	Módulos da balança aerodinâmica	37
FIGURA 15 -	Vista esquemática da balança aerodinâmica	38
FIGURA 16 -	Balança aerodinâmica não montada na câmara de ensaio	39
FIGURA 17 -	Balança aerodinâmica montada no túnel de vento	39
FIGURA 18 -	Ponte de extensômetros com os instrumentos de medição	43
FIGURA 19 -	Esquema da calibração da balança aerodinâmica	45
FIGURA 20 -	Resultados da calibração do módulo de sustentação	46
FIGURA 21 -	Resultados da calibração do módulo de arrasto	46
FIGURA 22 -	Sistema de rotação do cilindro (Túnel de vento LAE-3)	47
FIGURA 23 -	Esquema do experimento em túnel de fumaça	48
FIGURA 24 -	Perfis de velocidade dos jatos usados	50
FIGURA 25 -	Curva experimental / teórica para a injeção de massa	51
FIGURA 26 -	Determinação da quantidade de movimento da esteira	53
FIGURA 27 -	Esteira do cilindro circular	55

FIGURA 28 -	Esteira mais jato V90 do cilindro circular	56
FIGURA 29 -	Esteira mais jato V110 do cilindro circular	56
FIGURA 30 -	Esteira mais jato V120 do cilindro circular	57
FIGURA 31 -	Valores de Cd dos casos estudados do cilindro circular	57
FIGURA 32 -	Medida da oscilação na esteira do cilindro parado	59
FIGURA 33 -	Oscilações na esteira com jato V80	60
FIGURA 34 -	Oscilações na esteira com jato V100	60
FIGURA 35 -	Oscilações na esteira com jato V120	61
FIGURA 36 -	Esteira do cilindro rodando	62
FIGURA 37 -	Esteira mais jato V80 do cilindro rodando	63
FIGURA 38 -	Esteira mais jato V90 do cilindro rodando	63
FIGURA 39 -	Esteira mais jato V100 do cilindro rodando	64
FIGURA 40 -	Esteira mais jato V110 do cilindro rodando	64
FIGURA 41 -	Esteira mais jato V120 do cilindro rodando	65
FIGURA 42 -	Valores de Cd dos casos estudados do cilindro rodando	65
FIGURA 43 -	Esteira do cilindro circular	67
FIGURA 44 -	Esteira mais jato V30 do cilindro circular	68
FIGURA 45 -	Esteira mais jato V45 do cilindro circular	68
FIGURA 46 -	Esteira mais jato V50 do cilindro circular	69
FIGURA 47 -	Coeficientes de arrasto para o cilindro circular	69
FIGURA 48 -	Esteira do poliedro quadrado	70
FIGURA 49 -	Esteira mais jato V45 do poliedro quadrado	71
FIGURA 50 -	Esteira mais jato V50 do poliedro quadrado	71
FIGURA 51 -	Esteira mais jato V60 do poliedro quadrado	72
FIGURA 52 -	Esteira mais jato V70 do poliedro quadrado	72
FIGURA 53 -	Coeficientes de Arrasto para o poliedro quadrado	73
FIGURA 54 -	Curvas de Cd pelo número de Reynolds para vários tipos jatos	74
FIGURA 55 -	Diferença entre Cd provocado por cada jato e Cd da esteira básica	75
FIGURA 56 -	Cilindro sem injeção de massa	76
FIGURA 57 -	Cilindro com jato V10	76
FIGURA 58 -	Cilindro com jato V20	77
FIGURA 59 -	Cilindro com jato V30	78
FIGURA 60 -	Cilindro com jato V40	78
FIGURA 61 -	Imagem aproximada dos vórtices	79
FIGURA 62 -	Cilindro rodando sem jato	80

FIGURA 63 -	Cilindro rodando com jato V10	80
FIGURA 64 -	Cilindro rodando com jato V20	81
FIGURA 65 -	Cilindro rodando com jato V30	81
FIGURA 66 -	Cilindro rodando com jato V40	82
FIGURA 67 -	Cilindro rodando com jato V50	82
FIGURA 68 -	Cilindro rodando com jato V60	82
FIGURA 69 -	Vista aproximada do cilindro rodando com jato V60	83
FIGURA 70 -	Cilindro rodando com jato V70	83
FIGURA 71 -	Vista aproximada do cilindro rodando com jato V70	83
FIGURA 72 -	Poliedro quadrado sem injeção de massa	84
FIGURA 73 -	Poliedro quadrado com injeção de massa	85
FIGURA 74 -	Poliedro quadrado inclinado sem injeção de massa	85
FIGURA 75 -	Poliedro quadrado inclinado sem injeção de massa	85
FIGURA 76 -	Poliedro triangular sem injeção de massa	86
FIGURA 77 -	Poliedro triangular com injeção de massa	86
FIGURA 78 -	Esquema geral do equipamento de proteção	93
FIGURA 79 -	Vista superior do complexo	94
FIGURA 80 -	Visualização do efeito de redução e controle da esteira	95
FIGURA 81 -	Tensões causadas pelos efeitos aerodinâmicos em estruturas	95
FIGURA 82 -	Nova configuração da entrada do túnel de vento LAE-2	98
FIGURA 83 -	Dimensões da colmeia retificadora	99
FIGURA 83 -	Colmeia montada no túnel de vento	100

iii

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 -	Lei das potências	22
TABELA 02 -	Características dos jatos	50
TABELA 03 -	Valores teóricos para a injeção de massa	52
TABELA 04 -	Dados cilindro parado	58
TABELA 05 -	Dados cilindro rodando	66
TABELA 06 -	Dados cilindro circular	70
TABELA 07 -	Dados poliedro quadrado	73

LISTA DE SÍMBOLOS

- A área, m^2
- *b* largura de jatos ou esteiras, m
- *B* comprimento de jatos ou esteiras, m
- *C_d* coeficiente de arrasto
- *E* módulo de elasticidade longitudinal, kgf/cm²
- d, h dimensões, m
- D força de arrasto, N
- F força, kgf
- J quantidade de movimento, N
- comprimento de mistura
- L envergadura, m
- R resistência elétrica, Ω
- x, y coordenadas cartesianas
- u, v componentes de velocidade, m/s
- $U\infty$ velocidade do escoamento livre, m/s
- W peso, kgf
- ρ densidade, kg/m³
- ρ^* resistividade elétrica
- τ tensão de cizalhamento, N/m²
- ε viscosidade cinemática virtual em escoamentos turbulentos
- ϕ diâmetro, m

RESUMO

CROCE, J. A. G. (1998). Determinação do efeito da injeção de massa na esteira de um cilindro fixo rotativo. São Carlos, 1998. 102p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo.

Um trabalho experimental foi realizado para medir o efeito da injeção de massa na esteira formada por um cilindro bidimensional fixo e rodando. Um jato fez a injeção de massa através de um pequeno cilindro localizado atrás do cilindro principal. A posição do jato podia ser mudada para assegurar que a injeção de massa fosse feita direto na esteira. Um túnel de vento de baixa turbulência foi usado para visualização do escoamento ao redor dos cilindros fixo e rotativo. A distribuição de velocidade atrás do cilindro foi medida com um anemômetro de fio quente a temperatura constante em uma malha de 100 pontos. Um túnel de vento de circuito aberto foi usado para a medição da força de arrasto gerada pelo cilindro fixo medido através de uma balança aerodinâmica especialmente construída. Resultados mostraram que pequenos jatos podiam reduzir a esteira dos cilindros fixo e rotativo significativamente levando à redução do arrasto. O jato e a esteira misturados medidos em detalhes à jusante do modelo mostraram que a camada de mistura do jato suavizava rapidamente o gradiente de velocidade entre o jato e a esteira. Como o jato soprava para fora do cilindro principal, este sistema poderia ser usado para controlar a formação do deslocamento de vórtices de estruturas como pontes, chaminé e torres.

Palavras-chave: Corpos rombudos; efeito Magnus; redução de arrasto; injeção de massa.

ABSTRACT

.

CROCE, J. A. G. (1998). *Determination of the mass injection effect in the wake of a fixed and rotating cylinder*. São Carlos, 1998. 102p. MSc Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Experimental work was performed for the measurement of the effect of mass injection in a wake of a fixed and a rotating two-dimensional cylinder. The jet was injected by means of a small cylinder located just behind the main cylinder. The jet position could be adjusted in order to assure that the blowing was directed into the wake. A very low turbulence wind tunnel was used for flow visualization of both a fixed and rotating cylinder. The velocity distribution behind de cylinder was measured by a constant temperature hot wire anemometer in a grid of 100 points and at two downstream positions. A small open circuit wind tunnel was used for drag measurements using a special two component balance. Results showed that small jet flows could reduce significantly the wake of both fixed and rotating cylinders with the inherent reduction of the base drag. The jet and wake mixing measured in detail with a fine grid at the downstream positions showed that the jet mixing layer rapidly smoothes out the velocity gradient between jet and wake. As the jet was blowing outside the main cylinder this indicate that this system could be used to control the vortex shedding of structures such as bridges, chimney and towers.

Keywords: Bluff bodies; Magnus effect; drag reduction; mass injection.

1. INTRODUÇÃO

Cilindros com rotação imersos em escoamentos são elementos geradores de altos valores de força de sustentação mas com o inconveniente de produzirem também uma grande força de arrasto. Este equipamento pode ser tomado como um exemplo clássico de um elemento aerodinâmico que tem utilização restrita devido à força de arrasto. Outros corpos como silos graneleiros, chaminés, ou pontes os quais estão a todo tempo sujeitos à ação de escoamentos atmosféricos, sofrem em determinados casos influências indesejáveis devido também à força de arrasto. Estes corpos são considerados na ciência da aerodinâmica como corpos rombudos, ou seja, que apresentam uma grande seção transversal em relação ao comprimento longitudinal. Estes são objetos de vários estudos que visam a redução do arrasto por eles produzido o que tornariam suas aplicações mais práticas como também menos problemáticas.

No entanto não basta apenas determinar um método qualquer de redução na força de arrasto. É necessário garantir, na maioria dos casos, que estes métodos não produzam alterações estruturais ou, para o caso do cilindro rodando, não interfiram em seu processo gerador de força de sustentação. Desta forma é apresentado neste trabalho um processo de redução do arrasto em cilindros fixos e rodando que apresenta como característica principal a adaptabilidade em qualquer outro tipo de corpo rombudo. Este método é composto de um sistema, que através da injeção de massa na esteira, reduz significativamente a força de arrasto. O equipamento proposto consta de um pequeno cilindro de diâmetro igual a 8 milímetros com uma série de pequenos furos de 1 milímetros ao longo de seu comprimento montado dentro da região da esteira de um cilindro maior. Este pequeno cilindro tem a possibilidade de movimentação ao redor do cilindro principal, o que permite nos ensaios com o cilindro maior girando o ajuste para cada regime de rotação e velocidade de escoamento. Este método pode em princípio não parecer muito eficiente face a outros que controlam diretamente a formação da esteira pela interferência na camada limite, porém do ponto de vista de facilidade de aplicação, é muito adequado. Nos métodos tradicionais existem grandes dificuldades técnicas para a construção de sistemas de controle em cilindros rodando ou em estruturas já prontas

Com o método aqui proposto pretende-se determinar as características aerodinâmicas de um processo de redução do arrasto em cilindros parados e rotativos. Este método consiste em se colocar na esteira dos modelos um pequeno cilindro como o descrito acima, com a intenção de se injetar massa na esteira e desta forma reduzir seu tamanho e alterar também seu comportamento. Sendo o equipamento de injeção de massa montado externamente a estes corpos, o processo em quase nada altera a forma destes. Isto é vantajoso pois permite adaptações ao contrário de modificações estruturais. Para determinar as características do escoamento foram realizados uma seqüência de ensaios de visualização, anemometria a fio quente dos perfis de velocidade da esteira, e de medidas das forças de arrasto geradas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Efeito Maguns

É difícil atribuir a alguém a primeira observação do efeito da geração de uma força de sustentação em esferas e cilindros rotativos quando em movimento. SWANSON (1961) comenta que a primeira descrição do desvio lateral de um corpo rotativo em movimento foi gerada por G. T. WALKER em 1671. Tal corpo rotativo era uma bola de tênis arremessada com "efeito". NEWTON também comentou, em um artigo sobre a refração ótica para Real Sociedade de Londres, a respeito do movimento em curva de uma bola de tênis, onde ele supõe que as duas formas de movimento do projétil, progressão e rotação, combinam-se para gerar um impulso lateral. RAYLEIGH também estudou o fenômeno do desvio lateral em bolas de tênis.

ROBINS em seu livro publicado em 1742 faz referências a seus estudos do desvio lateral do movimento de corpos com rotação. Seus trabalhos envolveram basicamente projéteis disparados de armas de fogo. Em seus experimentos descobriu que o vôo de uma bala que deveria ser puramente parabólico, não alcançava todas as vezes a posição determinada. Ele ainda descreve que o movimento de uma bala é freqüentemente, além de parabólico, desviado para um lado qualquer devido a ação de uma força. Suas explicações para tal fenômeno são

que devido ao movimento de rotação da bala, adquirido de quando o tiro, e ao seu movimento progressivo, cada parte da superfície da mesma irá chocar-se com o ar em uma direção diferente da que teria se não estivesse em rotação e que a obliqüidade da ação do ar que surge nesta situação será maior. Segundo JOHNSON (1986), ROBINS não se refere à distribuição de pressão assimétrica produzida pelo efeito BERNOULLI, e que ocorre em corpos com rotação, pois as idéias sobre a relação entre a velocidade e a pressão foram determinadas apenas mais tarde, primeiro por D'ALEMBERT e posteriormente por EULER.

Seguindo o caminho trilhado por ROBINS, outro estudioso do desvio lateral de balas de artilharia foi DOUGLAS. Em 1850 ele notou numerosos resultados de deflexão de tiros anômalos ou excêntricos. Douglas descreve este fenômeno como sendo devido à desigualdade do atrito exercido nos lados opostos da bala pelo ar. Comenta também que tal é devido à não coincidência do centro de gravidade da bala com o centro geométrico, e finalmente à rotação diurna da Terra.

A determinação das características de um cilindro rodando sobre seu eixo axial foi primeiramente determinada por MAGNUS em 1852. Este trabalho demostrou de forma detalhada o fenômeno que aparecia em corpos cilíndricos quando estes girando sobre seu eixo de simetria e movendo-se linearmente apresentavam pequenas mudanças em suas trajetórias. MAGNUS é descrito por SWANSON (1961) como tentando determinar o desvio de projéteis fazendo toscos experimentos com balas de mosquetes com os centros de massa dos projéteis não coincidindo com seus centros geométricos, em um mosquete com o centro de massa em uma orientação conhecida. Se os centros de massa estavam para a direita, uma rotação no sentido horário ao redor do eixo de simetria do projétil seria

4

produzida pelo centro de pressão agindo através do centro geométrico e pela reação inercial agindo através do centro de massa.

MAGNUS também foi o primeiro a ver a necessidade da investigação experimental do fenômeno, não apenas em observações de projéteis de artilharia, mas em laboratório. Desta forma montou um aparato que, ao invés de balas ou esferas, utilizava cilindros. Seu objetivo era visualizar o efeito da alteração da pressão ao redor do cilindro rotativo. O experimento montado consistia em verificar esta alteração através de pequenos anteparos móveis montados em cada lado do modelo. Enquanto o cilindro estava parado e imerso em um escoamento de ar, os anteparos posicionavam-se no sentido do fluxo do ar. Mas quando rotação era imprimida ao cilindro, o que estava posicionado próximo onde a rotação do cilindro era na mesma direção da do escoamento, este aproximava-se da superfície do cilindro. Já o outro, que estava na posição oposta, afastava-se. Segundo JOHNSON (1986), a explicação encontrado por MAGNUS é que o fenômeno restava ligado com a variação da pressão com a velocidade pelo efeito BERNOULLI.

Outro experimento realizado por MAGNUS usava um cilindro rotativo ligado a um aparato que tinha como elemento básico uma balança de torção. Ele usou este equipamento para comprovar experimentalmente, que a força gerada pelo modelo em ensaio era suficiente para desviar projéteis de artilharia. A seguir podese ver as montagens usadas para os experimentos descritos acima.

5





Segundo ROBERTSON (1965), RAYLEIGH (1877) e LANCHESTER (1894) foram os primeiros a determinar que é necessário uma circulação ao redor de um corpo qualquer no escoamento para que apareça uma força lateral (sustentação na maioria dos casos). Já SWANSON (1961) refere-se a RAYLEIGH como sendo o primeiro a criar a representação correta do escoamento com circulação para corpos com rotação. No entanto, faz a ressalva que, na época, RAYLEIGH não deu nenhuma explicação física para o fenômeno, devido principalmente à carência da ciência de seu tempo de métodos matemáticos, para expressar de que maneira o atrito entre a superfície do corpo com rotação e o fluido chegam a produzir a circulação.

2.2. Cilindro com Rotação

PRANDTL (1927) a partir do inicio do século estudou diversas configurações de cilindro com rotação. Ele conduziu vários trabalhos com os quais investigou a configuração do escoamento ao redor destes modelos, como um experimento no qual foi utilizada a configuração de dois cilindros juntos rodando em sentido contrário. No caso de seus experimentos com um cilindro rotativo apenas, PRANDTL notou que o aparecimento de vórtices é completamente evitado no lado onde a velocidade de rotação é na mesma direção da do escoamento, e que já na parte oposta o aparecimento de vórtices era favorecido. Desta forma determinou que devido a vorticidade formar-se apenas a partir de uma superfície, o escoamento ao redor do cilindro tomava-se assimétrico.

LAVENDER (1925) conduziu uma série de experimentos de visualização da esteira gerada por cilindros rotativos. Ele descreve que para relação de velocidades entre a do escoamento livre e a velocidade de rotação igual a 1,5 a esteira gerada apresenta uma deflexão para baixo, mas ainda é caracterizada pela formação de vórtices periódicos iguais aos da esteira formada por cilindros sem rotação. Já com a relação de velocidades igual a 3,2 e 4,3 a formação de vórtices desaparece dando lugar a um formato de escoamento gerado pela união de uma circulação com as linhas de corrente de um cilindro em fluido perfeito. Quando a relação entre as velocidades atinge o valor de 10, LAVENDER descreve o escoamento ao redor do cilindro como formado por um vórtice permanente com o cilindro em seu centro. Os experimentos aqui descritos foram realizados em baixos números de Reynolds. Concluindo, LAVENDER escreve que, assim que a rotação aumenta diminui a

formação de vórtices, o que resulta na diminuição do arrasto registrado anteriormente por outros experimentos.

THOM (1926) realizou uma série de experimentos com cilindros rotativos com o objetivo de determinar o valor da sustentação e do arrasto. Estes experimentos compreenderam uma série de variações nas características do modelo e do túnel de vento usado com o intento de determinar a influências destas variações nas duas componentes de força. Os vários pontos investigados foram: a variação do diâmetro do cilindro e da velocidade de escoamento do túnel, a variação do alongamento do cilindro, o arredondamento das pontas do cilindro, o aumento da rugosidade superficial com o uso de areia e a variação da profundidade do túnel de vento. Para a medição das componentes de força, foi usada uma balança aerodinâmica de desenho simples, que media o valor do momento aerodinâmico do cilindro. Através das equações que relacionam o momento com as forças aerodinâmicas foi possível a determinação dos valores da sustentação e do arrasto.

2.3. Equipamentos com Cilindro com Rotação

Mais tarde o cilindro com circulação, como logo ficou conhecido, aparecia como uma alternativa de grande eficiência para a geração de sustentação, com aplicação tanto na parte aeronáutica quanto naval. Vários trabalhos de pesquisas e projetos um tanto quanto exóticos corneçaram à aparecer no cenário científico da época. A idéia de aeronaves sustentadas por cilindros com circulação, ou Rotores Magnus, tomava forma prática em inúmeros projetos.

Uma aplicação que produziu bons resultados foi apresentada por FLETTNER (1925). Ela compreendia a substituição das velas em embarcações por grandes cilindros rotativos colocados na posição vertical montados no convés. Em combinação com o vento, os cilindros rotativos propulsionavam o barco. Mais ainda, com a combinação de dois cilindros em tandem e rodando em direções opostas foi possível fazer a embarcação mudar sua direção. No entanto tal equipamento foi abandonado pois chegou muito tarde em uma época já dominada por embarcações propulsionadas a vapor.



FIGURA 2 – Navio propelido por Rotores Flettner. (LUDINGTON, 1943)

Na aviação a primeira aplicação do efeito Magnus como elemento gerador de sustentação em aeronaves foi uma experiência realizada nos EUA no início dos anos 30. Uma asa composta de cilindros rotativos, montados como cada semienvergadura, servia de superfície sustentadora de um avião projetado exclusivamente para tal pesquisa. O trabalho parece não ter gerado bons resultados devido a elementos complicadores como, por exemplo, um desenho da estrutura extremamente robusta o que gerava um peso muito elevado para a potência instalada, levaram ao insucesso da aplicação. A Figura 3 mostra a configuração da aeronave.



FIGURA 3 – Aeronave experimental com cilindros rotativos (BOWERS, 1984)

Outras aplicações com características um tanto insólitas são o uso de cilindros rotativos para a confecção de bombas hidráulicas e turbinas eólicas. Na Escola de Engenharia de São Carlos CAMARGO VIERA (1965) produziu um trabalho onde estuda a viabilidade da aplicação citada acima. Em seu trabalho foram testadas várias configurações de cilindros rotativos, tanto para o uso em turbinas eólicas, quanto para bombas hidráulicas, FIGURA 4. Testou também cilindros rotativos conjugados, um de diâmetro maior à frente e outro menor atrás. Provou que a rotação do cilindro menor reduzia a dimensão da esteira atrás do cilindro maior com , conseqüente, redução do arrasto do conjunto.



FIGURA 4 - Gerador eólico usando cilindros rotativos (CAMARGO VIEIRA, 1964)

Nos Institutos Canadense de Pesquisa Aeronáutica, muita ênfase foi dada ao estudo de dirigíveis que, além de utilizar o efeito de sustentação causado por reterem um fluido menos denso que o ar, produzissem força de sustentação pelo efeito Magnus. O exemplo mais característico desta técnica é o dirigível de Van Dusen, uma gigantesca esfera com diâmetro equivalente à um edifício de 18 andares, fixada por duas asas curvas a uma gôndola. Em seu processo de vôo, além da sustentação causado pelo Hélio, a esfera girava lentamente no sentido horário o que produzia o aparecimento de uma força de sustentação devido ao efeito Magnus.



FIGURA 5 – Concepção artística do dirigível de Van Dunsen (DEPARTMENTO OF EXTERNAL AFFAIRS, CANADÁ, 1988)

Outra aplicação do cilindro com rotação é no controle da camada limite pôr superfície móvel. Esta aplicação tem o objetivo de prevenir ou, no mínimo, atrasar a separação da camada limite das superfícies onde é formada. Os meios utilizados compreendem desde a injeção de massa, através de uma fenda, na superfície onde é formada a camada limite, até a configuração em que a superfície, ou parte dela, movimentam-se. Este último meio é mais facilmente obtido através do uso de cilindros rotativos adaptados aos corpos nos quais quer-se controlar a camada limite.

WOLF (1925) levou a cabo uma série de experimentos com cilindros rotativos colocados nos bordos de ataque de aerofólios. Segundo TIETJENS (1934), nesta série de experimentos foram obtidos dados de coeficiente de sustentação igual a 2,42 em ângulos de ataque que chegaram a 41,7°, sem que o aerofólio tivesse estolado.

Uma outra aplicação prática desse procedimento foi demonstrado pôr FAVRE (1938). Usando um aerofólio com a superfície superior formada por uma correia fixada em dois rolamentos, observou-se que o ponto de separação foi retardado até que o aerofólio atingisse um ângulo de ataque igual a 55°. Nesse ponto foi registrado o máximo coeficiente de sustentação, que foi de valor igual a 3,5. Outro exemplo dessa aplicação foi realizado por ALVAREZ-CALDERON e ARNOLD (1961) onde um cilindro rotativo foi usado como flap para desenvolver um aerofólio de altos valores de sustentação em uma aeronave do tipo 'STOL'. Esse equipamento foi testado em vôo em uma aeronave desenhada pela Divisão de Aeronáutica da *Universidad Nacional de Ingenieria* em Lima, Peru.

Outro equipamento que segue a mesma linha, foi a aeronave OV-10 (1971) da North American Rockwell tentada pelo Ames Research Center da NASA. Foram montados cilindros rotativos entre os bordos de fuga e os 'flaps' da asas, sendo que os cilindros eram rodados em altas velocidades e com os 'flaps' baixados. O principal objetivo dos testes foi obter qualidades de manobrabilidade da aeronave do tipo 'STOL' propulsionada por hélices em altos ângulos de ataque. Nos ensaios a aeronave foi levada a velocidades entre 29 a 31 m/s e ao longo de aproximações em angulo de ataque de 8°, o que gerava um coeficiente de sustentação igual a aproximadamente 4,3. Na opinião do piloto de testes qualquer eventual redução na velocidade de aproximação foi limitada pela estabilidade lateral e características de controle. Um grande trabalho com a intenção de entender o fenômeno a nível fundamental foi realizado por TENNANT et Al (1976). Foram realizados testes com um aerofólio em forma de cunha com um cilindro girando como sendo seu bordo de ataque. O máximo angulo de ataque que o aerofólio podia assumir foi limitado a 15° e a velocidade de rotação crítica do cilindro necessária para eliminar a separação foi determinada. Foi também determinado o efeito da fenda entre o cilindro e o aerofólio. Nenhum esforço foi feito no sentido de observar a influência do aumento da razão da velocidade superficial do cilindro com a do fluxo livre além de 1,2.

Já MODI et al (1990) foram mais fundo no estudo do controle de camada limite por superfícies moveis fazendo estudos com um aerofólio em forma de cunha com um cilindro girando como sendo seu bordo de ataque e também usando uma placa plana com ambos os bordos contendo cilindros rodando. Outro trabalho de MODI et al (1990) no mesmo sentido foi o estudo do controle de camada limite por superfície móvel em um aerofólio simétrico Joukowski.

2.4. Arrasto em corpos rombudos

O uso de cilindros rotativos, efeito Magnus, tem no grande arrasto aerodinâmico gerado um dos motivos principais para o abandono de seu uso em aplicações práticas. Também estruturas altas como edifícios, chaminés, ou pontes estão a todo tempo sujeitas à ação de escoamentos atmosféricos os quais produzem o aparecimento de forças de arrasto de grande magnitude. Estes tipos de corpos são normalmente alcunhados de corpos rombudos devido às suas dimensões de seção serem grandes ou por estarem posicionados com a superfície

14

de maior dimensão transversal voltada para o escoamento. O arrasto gerado por estes corpos é devido em parte ao atrito do ar com suas paredes mas é principalmente conseqüência do surgimento de esteiras. Estas esteiras são regiões de baixa pressão em relação ao escoamento livre circundante, formadas devido à separação da camada limite da superfície.

O conceito de camada limite foi introduzido primeiramente pôr PRANDTL (1927) e mudou o estudo da mecânica dos fluidos. Antes os fenômenos associados à formação de esteiras de baixa pressão atrás de corpos em escoamentos eram encarados de forma nebulosa. Com a introdução desse conceito observou-se que muito perto dos corpos imersos em escoamentos ocorre a formação de uma pequena região onde a velocidade decresce desde o valor da velocidade livre do escoamento até ao da velocidade da superfície da placa. Logo em seguida a estas observações iniciais foi mostrado que a camada limite estava associada com a formação de esteiras de baixa pressão a jusante de corpos imersos em escoamentos. O processo foi logo determinado como advindo do fato de que em determinadas condições essa camada limite descolava-se do corpo onde foi formada, indo tanto na direção do escoamento como também para longe da superfície do corpo. Dessa forma, logo após esse ponto de separação formava-se uma região onde o escoamento perdia energia na forma de quantidade de movimento e formava uma região de baixa pressão.

Métodos para a redução de arrasto em corpos rombudos abrangem um grande número de possibilidades. Inicialmente pode-se citar os métodos de redução de arrasto através do controle da camada limite. Muitos métodos para o controle da camada limite foram estudados visando desde a redução do arrasto de corpos em escoamentos livres até a melhoria dos coeficientes de sustentação de aerofólios. Métodos como sucção, sopro, geração de vorticidade, promotores de turbulência e superfícies móveis, têm sido investigados e empregados na prática com o mais variado grau de sucesso. Existem muitos outros métodos dedicados ao controle da camada limite. Pode-se ainda citar a injeção de um fluido diferente (camada limite binaria), e o resfriamento da parede.

O método mais obvio para evitar a separação da camada limite é evitar sua formação. Desde que a camada limite deve sua existência à diferença de velocidades do fluido entre a parede e o escoamento livre, é possível a eliminação da formação da camada limite pela supressão dessa diferença, ou, movendo a parede com a velocidade do escoamento livre. O controle da camada limite pôr superfície móvel tem o objetivo de prevenir ou no mínimo atrasar a separação da camada limite das superfícies onde é formada. Isto é feito de duas formas básicas:

- retardar o crescimento da camada limite pela minimização do movimento relativo entre a superfície e o fluxo livre e,
- 2) injetar quantidade de movimento na camada limite existente.

A mais simples forma de produzir uma superfície móvel é com um cilindro com rotação. Na superfície superior, onde o fluxo e o cilindro movem-se na mesma direção, a separação é completamente eliminada. Já na parte inferior do cilindro, onde a direção da velocidade do escoamento é contraria à do cilindro, a separação é desenvolvida incompletamente. No geral, o modelo de escoamento que existe neste caso aproxima-se do escoamento potencial ao redor de um cilindro com rotação. Uma forma alternativa de prever a separação consiste em injetar quantidade de movimento nas partículas de fluido que está sendo retardado na camada limite. Isso pode ser conseguido através da descarga de fluido proveniente do interior do corpo com o auxilio de um soprador especial, ou também pela derivação da energia necessária diretamente do escoamento ao redor. Este ultimo procedimento pode ser obtido conectando a região retardada a uma região de alta pressão através de um "slot" montado no corpo do modelo.

Outros processos ainda podem serem citados como a sucção da camada limite com a intenção de atrasar a separação e consequentemente reduzir o tamanho da esteira, PRANDTL (1927). Outros processos visam aumentar a intensidade da turbulência do escoamento através do posicionamento de pequenos cilindros à frente do corpo para provocar a diminuição do arrasto. Recentemente, IGARASHI (1997) obteve bons resultados de redução de arrasto em prismas quadrados através do posicionamento à frente do modelo de um pequeno cilindro. Ainda pode-se citar o uso de rugosidade na superfície de corpos imersos em escoamentos, para induzirem a transição da camada limite mais cedo , atrasando o ponto de separação com conseqüente redução da força de arrasto.

2.5. Esteiras e jatos bidimensionais turbulentos

Uma esteira é formada a jusante de um corpo sólido o qual encontra-se em movimento através de um fluido parado, ou a jusante de um corpo sólido imerso em um escoamento. As velocidades na esteira são menores que as do escoamento livre e às perdas em velocidade na esteira somam uma perda de quantidade de movimento que resultam no arrasto de pressão. A expansão da esteira aumenta com o aumento da distância em relação ao corpo, e as diferenças de velocidades dentro e fora da esteira tornam-se menores.

Um jato ocorre quando um certo fluido é injetado através de um bocal ou orifício. Desprezando velocidades muito pequenas de escoamento, é certo que o jato torna-se turbulento a pequena distância do ponto de injeção. Devido à viscosidade, o jato emergente torna-se parcialmente misturado com o fluido parado circundante. Partículas de fluido dos arredores são carregadas pelo jato, tanto que a vazão em massa aumenta na direção a jusante da região de injeção. Normalmente, o jato expande e sua velocidade máxima diminui, mas a quantidade de movimento total permanece constante.

Qualitativamente estes escoamentos são similares em regime laminar, mas existem grandes diferenças quantitativas em regime turbulento devidas ao fato do chamado atrito turbulento ser maior que o laminar. Escoamentos livres turbulentos são mais amenos para a análise matemática do que escoamentos turbulentos ao longo de paredes. Isto é devido à presença da sub-camada limite laminar muito próxima das paredes em escoamentos turbulentos sobre superfícies onde as tensões de cisalhamento geradas por estas, tem que ser levadas em consideração. Este fato torna a análise muito complicada.

Problemas sobre escoamentos turbulentos livres são de natureza semelhante à camada limite. Consequentemente é possível estudar estes casos com a ajuda das equações da quantidade de movimento e da continuidade, que no caso bidimensional são:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}$$
(1)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{2}$$

Onde τ denota o tensor das tensões turbulento e o termo de pressão foi eliminado na equação da quantidade de movimento, porque em todos os problemas é permissível assumir que a pressão permanece constante. No caso de esteiras isto é válido apenas a partir de uma certa distância do corpo.

Para integrar o sistema de equações acima é necessário expressar o tensor das tensões turbulento em termos de parâmetros do escoamento principal. No caso atual tal eliminação só pode ser conseguida com a ajuda de suposições semiempíricas. Desta forma é possível fazer uso da teoria do comprimento de mistura de PRANDTL, que pode ser expressa por:

$$\tau = \rho l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial u}{\partial y}$$
(3)

ou sua expansão,

$$\tau = \rho l^2 \frac{\partial u}{\partial y} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + l^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)^2}$$
(4)

Onde os comprimentos de mistura / e /₁ são funções locais. Estas devem ser adequadamente assumidas em cada caso particular. Ainda é possível usar a hipótese de PRANDTL, da seguinte forma.

$$\tau = \rho \varepsilon \frac{\partial u}{\partial y} = \rho x_1 b \left(u_{max} - u_{min} \right) \frac{\partial u}{\partial y}$$
(5)

Onde b é a largura da região de mistura e x₁ uma constante empírica. Desta forma:

$$\varepsilon = x_1 b \left(u_{max} - u_{min} \right) \tag{6}$$

A expressão anterior representa a viscosidade cinemática virtual assumida constante sobre toda a largura e, portanto, independente da distância x.

Quando se trata de problemas de esteiras ou jatos livres, assume-se que o comprimento de mistura, I, é proporcional à largura dos mesmos. Desta forma:

$$\frac{l}{b} = \beta = cons \tan te \tag{7}$$

A taxa de crescimento na largura b, da região de mistura com o tempo é proporcional à velocidade transversal v. Assim:

$$\frac{Db}{Dt} \approx v' \tag{8}$$

Aqui D/Dt é a derivada substancial, tanto que para regime permanente temse:

$$\frac{D}{Dt} = u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y}$$
(9)

Sendo v' proporcional a l ∂u/∂y, então:

$$\frac{Db}{Dt} \approx l\frac{\partial u}{\partial y} \tag{10}$$

Como o valor médio de $\partial u/\partial y$ tomado sobre metade da largura da região pode ser assumido como proporcional a $u_{máx}/b$, então:

$$\frac{Db}{Dt} = const. \frac{l}{b} u_{max} = const. \beta u_{max}$$
(11)

2.6. Similaridade entre esteiras e jatos bidimensionais

Quando se pretende soprar um jato dentro de uma esteira, ambos bidimensionais, com o intento de eliminar a perda de quantidade de movimento na esteira devido ao acréscimo da quantidade movimento gerada pelo jato, o primeiro passo a ser levado em consideração é determinar o valor da perda de quantidade de movimento na esteira. Para isto faz-se uso das equações pertinentes a este caso ou através de experimentos que procedam à medição direta ou indireta deste valor. De posse deste dado, parte-se para a determinação da velocidade máxima que o jato deve ter para a geração de uma quantidade de movimento de magnitude tal que elimine a que é gerada pela esteira. Outro ponto a ser determinado é que a distribuição de velocidades dos dois devam ter, a determinada distância atrás do corpo, perfis o mais semelhantes possíveis para que as velocidades do perfil do jato anulem as velocidades do perfil da esteira. Ou em outras palavras, os vetores das velocidades que estão em posições relativas iguais representam na esteira um déficit de velocidade e no jato um acréscimo de velocidade.

Estes dados são de difícil determinação mas algumas indicações de seus comportamentos são determinadas. A taxa de crescimento da largura e da diminuição em espessura dos perfis de velocidades são determinadas através da teoria de mistura de PRANDTL, tanto para a esteira quanto para o jato. Estas também podem ser determinadas e comparadas através de leis de potência

IABELA 1 – Lei das poter	ncias
--------------------------	-------

	Largura	Velocidade central
Esteira bidimensional	x ^{1/2}	x ^{-1/2}
Jato bidimensional	x	x ^{-1/2}

Através das características mostradas na tabela é possível determinar as condições iniciais que o jato deve ter para o objetivo desejado. Fica evidente, pelo exposto acima, que o jato tem uma taxa de crescimento maior que a da esteira. Já para a diminuição da velocidade central os dois apresentam o mesmo fator.
2.7. Esteira bidimensional

A taxa de crescimento da largura da região de mistura aumenta na distância em x na razão de:

$$\frac{Db}{Dt} = U_{\infty} \frac{db}{dx}$$
(12)

e na equação (11), u_{máx} é substituído por u₁, desta forma:

$$\frac{Db}{Dt} = const.\frac{l}{b}u_1 = const.\beta u_1$$
(13)

Onde $u_1 = U_{\infty} - u$. Equacionando-se as duas expressões acima, obtém-se:

$$\frac{db}{dx} \approx \beta \frac{u_1}{U_{\infty}} \tag{14}$$

O cálculo da quantidade de movimento em problemas envolvendo esteiras difere dos outros casos, porque agora existe uma relação direta entre a quantidade de movimento e o arrasto total do corpo. A equação para esta entidade é:

$$D = J = \rho \int u(U_{\infty} - u)dA \tag{15}$$

Sendo que a superfície de controle está colocada suficientemente distante atrás do corpo que forma a esteira, pois desta forma tem-se a pressão estática

24

dentro da esteira igual à do escoamento livre. A grandes distâncias do corpo a relação ($u_1 = U_{\infty} - u$) é pequena se comparado com U_{∞} , tanto que pode-se colocar :

$$u(U_{\infty} - u) = (U_{\infty} - u_1)u_1 \approx U_{\infty}u_1 \tag{16}$$

Então para o caso bidimensional, a quantidade de movimento fica:

$$D = J = \rho U_{\infty} \int u_1 dA \tag{17}$$

Para um corpo bidimensional de largura h e de espessura d, a equação para o cálculo do arrasto torna-se:

$$D = Cd\rho U_{\infty}^{2} hd \tag{18}$$

Já a equação da quantidade de movimento fica:

$$J = \rho U_{\infty} u_1 h b \tag{19}$$

Igualando as equações (19) e (18) de acordo com a expressão (17), obtémse:

$$\frac{u_1}{U_{\infty}} = \frac{C_d d}{2b} \tag{20}$$

Inserindo a equação para a razão do aumento da largura da esteira, obtémse:

$$b \approx \left(\beta x C_d d\right)^{\frac{1}{2}} \tag{21}$$

Colocando este valor na equação (20) chega-se a razão para qual *u*, diminui com relação a distância x atrás do corpo. Assim:

$$\frac{u_1}{U_{\infty}} \approx \left(\frac{C_d d}{\beta x}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(22)

Desta forma pode-se concluir que a largura da esteira aumenta na razão de $x^{1/2}$ e a velocidade diminui na razão de $x^{-1/2}$.

2.8. Jato bidimensional

Um jato turbulento que emerge de uma fonte não pontual, ou singular, é composto de regiões bem definidas. Estes jatos considerados são os que são injetados em ambientes compostos de fluidos com características semelhantes às suas próprias. Por exemplo jatos de ar injetados em ambientes compostos por ar, mas nunca ar injetado em um fluido como a água. Normalmente o jato emerge com um perfil de velocidades aproximadamente plano e turbulento. Camadas de misturas na região divisória do escoamento crescem entre o escoamento livre e a velocidade máxima do jato. O núcleo potencial decresce rapidamente com a distância. A jusante do núcleo o escoamento começa a desenvolver-se em um perfil de velocidades semelhante a uma curva 'gaussiana'. A Figura 6 apresenta melhor estas características.



FIGURA 6 - Características de um jato real. (WHITE, 1991)

A taxa de crescimento da largura da região de mistura aumenta na distância x na razão de:

$$\frac{Db}{Dt} \approx u_{m\alpha} \frac{db}{dt}$$
(23)

A componente u_{máx} representa a velocidade na linha central do jato. Em tais casos tem-se também:

A relação entre u_{max} e x pode ser obtida da equação da quantidade de movimento. Desde que a pressão permaneça constante a integral da componente x da quantidade de movimento avaliada sobre toda a seção de área transversal deve permanecer constante e independente de x. Desta forma:

$$J = \rho \int u^2 dA = cons \tan te \tag{25}$$

No caso de um jato bidimensional, tem-se J' = constante, onde J' é a quantidade de movimento por unidade de comprimento. Então para a relação de $u_{máx}$ tem-se:

$$u_{max} = const. \frac{1}{\sqrt{x}} \sqrt{\frac{J'}{\rho}}$$
(26)

(24)

3. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

3.1. Modelo Aerodinâmico montados no Túnel de vento LAE-2

Para os ensaios no túnel de vento LAE-2 utilizou-se como modelo um cilindro de 59 milímetros de diâmetro e 0,32 metros de comprimento total. Este foi confeccionado a partir de um tubo de alumínio e usinado na dimensão e no diâmetro mostrados acima. A superfície do modelo recebeu um acabamento para que se tomasse o mais lisa possível, impedindo que rugosidades afetassem o escoamento na camada limite. Este modelo foi utilizado nos experimentos de anemometria da esteira e medição da força de arrasto. Foi desenvolvido com a intenção de ser utilizado para os ensaios de cilindro parado e quando do cilindro rodando.

Nas extremidades do modelo foram montadas duas barras circulares divididas em duas seções com diâmetros diferentes. Uma das seções tinha o diâmetro igual a 55 milímetros e era montada internamente ao modelo. A outra parte, de diâmetro igual a 12 milímetros, em uma das peças usadas tinha comprimento igual a 25 milímetros e na outra comprimento igual a 60 milímetros. O diâmetro menor foi conseqüência da necessidade de montagem do modelo em mancais de rolamento. Como não iriam sofrer grandes cargas mecânicas, o material utilizado para confecção foi o aço ABNT 1020. A figura 7 apresenta o esquema do modelo e suas peças.



FIGURA 7 - Esquema do modelo com suas partes principais



FIGURA 8 - Vista do modelo montado na câmara de ensaio

3.2. Modelos Aerodinâmicos montados no Túnel de vento LAE-3

Nos experimentos realizados no túnel de vento LAE-3 foram usados três modelos diferentes. Estes eram um cilindro circular, que podia rodar para o caso em que os ensaios de cilindro com rotação eram exigidos, um poliedro de seção quadrada e um poliedro de seção triangular. Todos tinham o comprimento igual ao

da câmara de ensaio e suas dimensões de seção são mostradas na Figura 8. A configuração básica utilizada consistia no cilindro circular com uma barra cilíndrica de duas seções com diâmetros diferentes montada em uma de suas extremidades. A seção de diâmetro maior, 55 milímetros, foi montada internamente ao modelo, e outra de diâmetro igual a 12 milímetros foi montada em um mancal fixado na parede traseira da câmara de ensaio. Apenas uma barra foi usada pois era necessário que o campo de visão ficasse livre para os ensaios de visualização do escoamento.

Os outros modelos eram ocos e abertos em suas extremidades o que permitia que fossem montados ao redor do cilindro circular. Desta forma a troca dos modelos no decorrer dos ensaios foi facilitada. O cilindro foi confeccionado a partir de um tubo de fenolite, pois necessitava-se de um modelo de pouca massa e certa resistência mecânica quando eram realizados os ensaios com rotação.



FIGURA 9 - Modelos usados nos ensaios no túnel LAE3.

3.3. Equipamentos de injeção de massa

Para todos os ensaios realizados neste trabalho foram montados equipamentos de injeção de massa com praticamente as mesmas características. Estes basicamente eram compostos de um cilindro oco de diâmetro igual a 6 milímetros, com comprimentos um pouco menores que os das câmaras de ensaio onde foram montados. Uma série de furos com diâmetro igual a 1,5 milímetros foram feitos de uma extremidade a outra do cilindro. A extremidade superior era vedada enquanto que a outra era ligada a um tubo por onde se fazia a ligação com o equipamento de injeção de massa. O cilindro era montado em uma placa circular composta de um anel por onde fixava-se o conjunto em um dos mancais de rolamento. O conjunto era livre para movimentar-se e podia adquirir a posição angular desejada. A Figura 10 mostra o sistema montado no túnel de vento LAE-3.



FIGURA 10 – Sistema de injeção de massa

Para os ensaios no túnel de vento LAE-3 foi usado um compressor de ar ligado diretamente no cilindro furado. Já nos ensaios no túnel LAE-2 foram usados dois compressores de ar ligados em paralelo. Isto foi necessário pois requeria-se maior vazão no sistema. Para a medição da vazão foi usado um rotâmetro.

3.4. Medição das velocidades da esteira no túnel de vento LAE-2

Foram realizados uma série de ensaios para o levantamento dos perfis de velocidades das esteiras geradas pelo cilindro fixo e rodando, com e sem a injeção de massa. Isto foi feito com a intenção de determinar a influência da injeção de massa na alteração da distribuição de velocidades nas esteiras. Foi montado na câmara de ensaio do túnel de vento LAE-2 um experimento que utilizava um anemômetro a fio quente para medir as velocidades. O modelo usado foi o cilindro apresentado no item 3.1. Com o cilindro rodando e a esteira sendo defletida para um dos lados, foi necessário escolher uma posição de montagem mais adequada. Neste sentido montou-se o cilindro verticalmente na câmara de ensaio, pois esta sendo de seção retangular e tendo a maior largura no sentido horizontal a influência das paredes seriam minimizadas. A Figura 11 mostra um esquema geral da montagem.



FIGURA 11 - Anemometria no túnel de vento LAE-2

O modelo foi montado em dois mancais de rolamentos sendo que o superior foi fixado na parede externa do túnel de vento e o inferior na parede interna. O sistema de rotação do cilindro era composto de um motor de corrente alternada, duas polias e uma correia. Umas das polias era montada no eixo do motor e a outra no eixo da barra circular do cilindro. Eram ligadas pela correia que transmitia o movimento do motor para o cilindro. O controle de velocidades era feito através do aumento ou diminuição da tensão no motor controlado por um Variac. A rotação do cilindro era medida por um sensor magnético e a leitura feita em um frequencímetro.

O sistema usado para a medição das velocidades foi um anemômetro de fio quente a temperatura constante. Este equipamento mede diretamente a velocidade do escoamento e faz as necessárias correções para as variações de temperatura. A sonda anemométrica foi montada em uma barra cilíndrica que atravessava, no sentido horizontal, a câmara de ensaio de uma parede a outra. Isto permitia o posicionamento da sonda em qualquer posição ao longo de uma linha transversal a jusante do modelo. A barra era fixada em um equipamento posicionador que movimentava o conjunto em passos fixos e com grande precisão.

3.5. Medição das velocidades na esteira no túnel de vento LAE-3

Os ensaios realizados no túnel de vento LAE-3 tem as mesmas características do que os realizados no túnel LAE-2. As poucas diferenças residem no esquema geral da montagem dos sistemas utilizados. A sonda anemométrica foi neste caso montada no sentido vertical na câmara de ensaio. Isto devido a este

33

túnel de vento ser montado na vertical. A Figura 12 apresenta uma vista geral da montagem do ensaio de anemometria.



FIGURA 12 - Montagem do ensaio de anemometria no túnel LAE-3

3.5. Medição da força de arrasto

O experimento para a avaliação da força de arrasto em regimes sem e com a injeção de massa na esteira foi montado no túnel de vento LAE-2. Este ensaio consistiu em medir a força de arrasto através de uma balança aerodinâmica variando-se o valor da injeção de massa. O modelo aerodinâmico usado é o mesmo utilizado nos ensaios de anemometria e descrito no item 3.1. Tinha-se a intenção inicial de se fazer ensaios com o cilindro parado e rodando. No entanto a balança aerodinâmica não apresentou bons resultados com o cilindro rodando, limitando o experimento ao caso fixo. O suporte do modelo aerodinâmico usado é composto de três elementos principais. Estes elementos são uma placa de suporte, uma trave superior e uma trave inferior. A montagem destes elementos gera uma única peça em forma de "U". A placa de suporte é onde as traves são afixadas e também a peça que serve de união com a balança aerodinâmica. Ela é composta de quatro furos para a fixação na balança e mais quatro que servem para segurar as traves. A trave superior é composta de quatro peças individuais que são soldadas para gerar a forma desejada. Na parte traseira existem dois furos que a fixam na placa de suporte. A trave inferior difere da superior na forma composta por três peças. Este arranjo diferente é motivado pela necessidade de fácil desmontagem para a retirada do modelo aerodinâmico. O modelo aerodinâmico é montado entre as duas traves. A Figura 13 apresenta o esquema geral do sistema de suporte.



FIGURA 13 – Sistema de suporte do modelo aerodinâmica

35

3.6. Balança Aerodinâmica

A Balança Aerodinâmica é o melhor equipamento para a medição das componentes de força, sustentação e arrasto, em corpos imersos em escoamentos. Sua utilização para a pesquisa aeronáutica abrange desde a determinação das forças em corpos aerodinâmicos simples até modelos reais em escala natural. Para a determinação do arrasto no modelo estudado projetou-se e construiu-se uma balança aerodinâmica específica.

A configuração da balança projetada levou em conta primeiramente alguns fatores básicos que irão determinar a qualidade dos dados por ela medidos. Esses fatores irão ditar uma seqüência lógica de projeto para a balança. Segundo MAUNSELL (1977) estes fatores são:

- A falta de partes móveis, que poderiam provocar atritos e consequentemente variações e erros de medida;
- A utilização de extensômetros elétricos para a medição dos esforços aerodinâmicos sofridos pelo modelo a ser testado;
- A necessidade de alta rigidez da estrutura do aparelho, aliado a uma alta elasticidade das lâminas, de maneira a minimizar os erros de medida durante sua utilização;
- O registro independente, de cada um dos esforços aerodinâmicos; força de sustentação e força de arrasto.

A balança construída consiste basicamente de três módulos em forma de molduras, onde são fixadas as lâminas com extensômetros. Estes módulos são feitos de barras de aço ABNT 1020 de perfil retangular com as seguintes dimensões: largura de 40 milímetros e espessura de 20 milímetros. As barras, no total de quatro para cada modulo, foram cortadas nas dimensões projetadas e soldadas para terem o formato das molduras desejadas. Duas molduras usadas são de dimensões e formato idêntico e a outra tem uma dimensão diferente. A seguir são mostrados na Figura 14 as dimensões e nomenclaturas adotadas para cada módulo.



FIGURA 14 – Módulos da balança aerodinâmica

A moldura 1 tem a função de base e de suporte primário para as lâminas que medem a força de sustentação. As molduras 2 e 3 são peças idênticas tanto em dimensão quanto em forma. Na moldura 2 são fixadas as outras extremidades das lâminas de sustentação e as lâminas responsáveis pela medição da força de

arrasto. Na moldura 3 estão fixadas as outras extremidades das lâminas que medem o arrasto. Nesta moldura é montado também o suporte para o modelo aerodinâmico. A Figura 15 apresenta um esquema representando a balança e seus elementos principais



FIGURA 15 - Vista esquemática da balança aerodinâmica

A balança aerodinâmica foi montada em uma barra de aço com a intenção de garantir alta rigidez para o conjunto. Para tanto esta barra foi fixada em um bloco de concreto no solo ao lado do túnel de vento. Quatro parafusos faziam a fixação da barra ao solo. Outros quatro furos na parte superior da barra serviam para fixar a balança. Esta ficava posicionada na altura da câmara de ensaio permitindo, através do suporte em forma de 'U', a montagem do modelo aerodinâmico na câmara de ensaio e em posição de experimento no túnel de vento.

38



FIGURA 16 - Balança aerodinâmica não montada na câmara de ensaio



FIGURA 17 - Balança aerodinâmica montada no túnel de vento

3.7. Circuitos Elétricos

O circuito elétrico montado para a leitura dos esforços solicitados à balança aerodinâmica consiste em uma ponte de Wheatstone completa de quatro resistências elétricas ativas. Esta configuração foi adotada devido à resposta gerada pelo desbalanceamento da ponte ser de boa intensidade mesmo em pequenos carregamentos solicitados nas lâminas. Duas pontes são montadas, uma para a leitura da força de sustentação e a outra para a de arrasto. Em cada uma delas existem dois extensômetros sob tração e dois sob compressão. Esta configuração segue o seguinte esquema: cada lâmina tem um extensômetros colocado em cada lado, de modo que a flexão da lâmina causa a tração de um e compressão do outro. Isto é necessário para que se consiga o auto-balanceamento dos extensômetros e a anulação do efeito de temperatura.

Os extensômetros são sensores que medem tensões diretamente pela variação no valor de sua resistência elétrica, quando deformados mecanicamente. Existem muitos modelos comerciais e de usos especiais, mas, em principio, todos são compostos de um elemento resistivo que consta de um condutor de pequena seção transversal, feito de ligas metálicas como o níquel-cobre, ou o níquel-cromo. Eles são aplicados por meio de adesivos aos elementos onde estão as tensões aplicadas ou as deformações pertinentes que se deseja medir. Quando os materiais a que são aderidos, estão em regime elástico de deformação, esta é proporcional à tensão e portanto diretamente medida. Os modelos mais comuns vêm ainda providos de terminais metálicos para ligações elétricas.

Como visto acima a resposta dos extensômetros sob deformação é devida à variação do valor de sua resistência elétrica. Esta deformação, ΔI , no seu comprimento e ΔA na sua área transversal, com a conseqüente variação na sua resistência, é igual a:

$$\frac{R_f - R}{R} = \frac{\Delta R}{\rho^* l/A}$$
(27)

Onde R é a resistência inicial do extensômetro, R_f a resistência final, ρ^* a resistividade do material, I o comprimento inicial e S a área da seção inicial. O passo seguinte é considerar ρ^* constante, e desprezar os efeitos de piezorresistividade, que é o fenômeno da variação da resistividade do material quando submetido a deformações ou tensões. Quando o material encontra-se em regime elástico e com deformações relativas pequenas $\Delta l/l$ (da ordem de 1%), pode-se supor que o volume seja constante e que a deformação relativa da seção do fio seja igual à do comprimento, ou seja, ($\Delta S/S = \Delta l/l$). Assim a resistência final será:

$$R_{f} = \rho * \frac{l + \Delta l}{A \frac{l}{l + \Delta l}} = \frac{\rho * (l + \Delta l)^{2}}{Al}$$
(28)

Essa aproximação implica em se fazer o coeficiente de constrição lateral, chamado de coeficiente de Poison, igual a 0,5, o que é relativamente grosseiro.

Desenvolvendo o quadrado de I + ∆I, e desprezando-se os termos de segunda ordem, por se tratarem de deformações relativas muito pequenas, obtém-se:

$$R_f = \rho * \left(\frac{l + 2\Delta l}{A}\right) \tag{29}$$

Substituindo na expressão 28, fica-se com:

$$\frac{\Delta R}{R} = 2\frac{\Delta l}{l} \tag{30}$$

Ou seja, como já mencionado anteriormente, a variação da resistência ∆R é proporcional à deformação do elemento resistivo, que está vinculado, no global, à deformação relativa das lâminas onde os extensômetros são montados.

Os extensômetros, como já discutido, são montados em ponte de Wheatstone completa onde dois estão sob o regime de tração e dois sob compressão. Acima demonstrou-se a forma de relacionar a variação da deformação com a variação da resistência elétrica de cada elemento ativo. Agora procede-se a determinação da variação da deformação dos extensômetros com a variação das solicitações principais sofridas pela balança aerodinâmica. Para efeito de simplicidade, determina-se as relações para uma lâmina o que é por conseguinte semelhante para as outras. Utilizando a expressão referente ao alongamento sofrido pelas lâminas da plataforma que mede a sustentação (ver Figura 18) segue-se que:



FIGURA 18 - Ponte de extensômetros com os instrumentos de medição

O alongamento do extensômetro em tensão colocado nas lâminas de sustentação é,

$$\varepsilon_{L1T}^{*} = \frac{1}{E} \frac{F_{L1Z}}{bh} + \frac{3F_{L1X}L}{bh^{2}} + \frac{3(F_{L1Y} - W_{L})L}{b^{2}h} + \varepsilon_{T}^{*}$$
(31)

e o alongamento do extensômetro em compressão,

$$\varepsilon_{L1C}^{*} = \frac{1}{E} \frac{F_{L1Z}}{bh} - \frac{3F_{L1X}L}{bh^{2}} + \frac{3(F_{L1Y} - W_{L})L}{b^{2}h} + \varepsilon_{T}^{*}$$
(32)

Onde ϵ_T indica o alongamento causado por mudanças na temperatura e por seguinte dilatações do material em uso, então:

$$\varepsilon_{L1T} * -\varepsilon_{L1C} * = \frac{1}{E} \frac{6F_{L1X}L}{bh^2}$$
(33)

e pelo mesmo raciocínio aplicado à segunda lâmina de sustentação, tem-se:

$$\varepsilon_{L2T}^{*} - \varepsilon_{L2C}^{*} = \frac{1}{E} \frac{6F_{L2X}L}{bh^2}$$
(34)

Desta forma fica evidente a anulação dos efeitos causados pela temperatura nas equações que regem o alongamento das lâminas. Outro ponto importante é que no caso do sistema usado para fazer a aquisição dos dados, a leitura foi direta em termos de alongamento. Isto pode ser representado pela união da equação 30 com a equação 34, onde a variação de resistência elétrica do extensômetro pode ser representada pela variação do alongamento. Assim:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 2 \frac{1}{E} \frac{6F_{L2X}L}{bh^2}$$
(35)

3.8. Calibração da Balança Aerodinâmica

A calibração da balança aerodinâmica foi realizada com todo o conjunto montado dentro da câmara de ensaio. Isto foi feito para evitar que uma calibração feita com o conjunto em outra posição pudesse apresentar resultados errôneos. O sistema usado na calibração consistiu de uma roldana montada na câmara de ensaio na altura média do modelo, de um fio de náilon e de um recipiente para os pesos de calibração. Utilizou-se cinco elementos de massa igual a 0,25 kg os quais foram sucessivamente colocados no recipiente. A cada passo foi registrado o valor correspondente dado pela balança aerodinâmica. A Figura 19 apresenta o esquema geral usado para a calibração da balança.



FIGURA 19 - Esquema da calibração da balança aerodinâmica.

Os dados coletados foram tratados e, através do uso de regressão linear para cada conjunto de dados, foram obtidas as relações entre os pesos e a leitura registrada. As influências das forças umas nas outras foram também analisadas o que permitiu que estas fossem totalmente subtraídas melhorando a precisão. A seguir são apresentados na Figura 20 os resultados para a calibração da sustentação e na Figura 21 para o arrasto.



FIGURA 20 - Resultados da calibração do modulo de sustentação



FIGURA 21 - Resultados da calibração do modulo de arrasto

3.9. Experimento de visualização

Foi realizada uma série de ensaios de visualização em diversos modelos aerodinâmicos. Estes ensaios foram realizados no túnel de vento LAE-3 e registrados através de fotografias. Este túnel de vento é de circuito aberto, de baixa turbulência e montado verticalmente ao solo. Na entrada da câmara de ensaio é montado um pente de tubos ligado a um equipamento gerador de fumaça. Através deste pente saem os filetes de fumaça que permitem a visualização do escoamento. A câmara de ensaio deste túnel tem, em suas laterais, lâmpadas com as quais iluminam-se os filetes de fumaça aumentando o contraste para o registro fotográfico.

O sistema que movimentava o modelo no túnel de vento LAE-3 consistia de um motor elétrico de corrente contínua, duas polias e uma correia. O conjunto foi montado em uma placa fixada externamente na parede traseira da seção de ensaio. O motor continha uma polia em seu eixo que, através da correia, transmitia o movimento para a outra polia. Esta foi montada na barra cilíndrica que fazia parte do cilindro usado nos ensaios. A Figura 22 mostra a vista geral do sistema.



FIGURA 22 – Sistema de rotação do cilindro (Túnel de vento LAE-3)

O sistema que sopra ar na esteira gerada pelos modelos consta de um pequeno cilindro colocado logo atrás do modelo em todo seu comprimento, como foi discutido no item 3.3. Este pequeno cilindro é composto de uma série de pequenos furos na sua parte traseira, por onde é soprado ar. Uma de suas extremidades foi lacrada e a outra é ligada por um tubo de plástico por onde é escoado o ar para o sopro. Uma placa com um rasgo em meia circunferência foi colocado entre a extremidade interna do modelo e a parede traseira da câmara de ensaio. Desta forma torna-se possível movimentar o cilindro usado para o sopro em toda dimensão da esteira gerada pelo modelo aerodinâmico.



FIGURA 23 - Esquema do experimento em túnel de fumaça.

4. RESULTADOS

4.1. Características da injeção de massa

Tanto para o experimento no túnel LAE-2 quanto para o do túnel LAE-3 foram usados o mesmo tipo de equipamento de injeção de massa. Apenas as proporções não eram as mesmas, mas a área de injeção foi mantida praticamente a mesma em ambos os casos. Assim o primeiro passo tomado nos ensaios foi o de se determinar uma relação entre a injeção de massa e a leitura no equipamento de medida de vazão. Desta forma obteve-se a relação entre a leitura no rotâmetro e o valor da quantidade de movimento gerada pela injeção de massa. Optou-se por relacionar o valor da quantidade de movimento gerada pela injeção de massa pois esta mantém-se constante à uma grande distância a jusante do ponto onde foi iniciada. A seguir foram medidas uma série de perfis de velocidades de jatos e calculados seus valores de quantidade de movimento, como é mostrado as seguir.

A partir do modelo integral da quantidade de movimento, pode-se escrever que

$$F_J = \rho B \int_{-\infty}^{+\infty} u_J^2 dy$$
(36)

Onde *B* é o largura do jato, que no caso será considerado como sendo unitário pois está-se interessado no efeito na unidade de envergadura do cilindro; ρ a densidade do fluido; y a distância transversal ao jato entre cada estação de medida; e u_J é a distribuição de velocidades dos jatos. A seguir, na Figura 24, são apresentados os perfis de velocidade dos jatos medidos, e na Tabela 2 os resultados calculados.



FIGURA 24 - Perfis de velocidade dos jatos usados

	Velocidade Máxima	Quantidade de Movimento
	(m/s)	(N)
Jato V20	0,202	0,04238
Jato V40	0,585	0,05622
Jato V60	1,168	0,09052
Jato V80	1,745	0,12326
Jato V100	2,435	0,19398
Jato V120	3,151	0,2994

TABELA 2 – Características dos jatos



Com os valores de quantidade de movimento dos jatos calculados na Tabela 2 procede-se com a determinação de uma relação entre os valores de leitura no rotâmetro e a quantidade de movimento teórica. Isto foi conseguido através da determinação de uma equação polinomial ajustada aos dados fornecidos pela Tabela 2. Esta equação foi obtida através da determinação de uma curva que representasse a maior aproximação possível com a curva experimental dos dados de quantidade de movimento. Assim obteve-se uma relação com a qual é possível calcular os valores de quantidade de movimento dos jatos da injeção de massa para qualquer valor de leitura no rotâmetro. A seguir a Figura 25 apresenta as curvas experimental e teórica usadas na determinação da relação e a Tabela 3 apresenta alguns valores calculados com esta relação.



FIGURA 25 – Curva experimental / teórica para a injeção de massa

	Leitura no	Quantidade
	Rotâmetro	de Movimento
	(m)	(N)
Jato V0	0	0
Jato V10	0,01	0,02338
Jato V20	0,02	0,0395
Jato V30	0,03	0,0515
Jato V40	0,04	0,06175
Jato V50	0,05	0,07238
Jato V60	0,06	0,08539
Jato V70	0,07	0,10254
Jato V80	0,08	0,12543
Jato V90	0,09	0,15544
Jato V100	0,1	0,19378
Jato V110	0,11	0,24147
Jato V120	0,12	0,29932

TABELA 3 – Valores teóricos para a injeção de massa

4.2. Distribuição de Velocidade a jusante do Modelo

O procedimento experimental utilizado nos ensaios para a medição dos perfis de velocidades nas esteiras foi o de fazer uma varredura com um anemometro de fio quente a uma certa distância a jusante dos modelos. De posse dos perfis de velocidades medidos calculou-se os respectivos valores de quantidade de movimento. O importante a ser observado é que a quantidade de movimento que os perfis de velocidades das esteiras produzem estão associados

com a força de arrasto gerado pelo corpos que as formam. Mais precisamente, a perda em quantidade de movimento gerada pela distribuição de velocidades na esteira é igual ao valor da força de arrasto de perfil, ou total.

Para proceder corretamente com a determinação da quantidade de movimento gerada pelas esteiras, primeiro seleciona-se um volume de controle ao redor do modelo estudado. A Figura 26 apresenta a representação idealizada do escoamento ao redor de um modelo e seu volume de controle adotado. Aplicando o teorema integral da quantidade de movimento entre as superfícies A e B, e fazendo as hipóteses e simplificações necessárias, obtém-se.



FIGURA 26 – Determinação da quantidade de movimento da esteira

$$D = \rho B \int_{-\infty}^{+\infty} u(U_{\infty} - u) dy$$
(37)

Onde *B* é o largura da esteira, que no caso será considerado como sendo unitário pois está-se interessado no efeito na unidade de envergadura do cilindro; ρ a densidade do fluido; *y* a distância transversal à esteira entre cada estação de medida; U_{∞} a velocidade do escoamento livre ; e *u* é a distribuição de velocidades da esteira. Com os valores do arrasto é possível calcular seu coeficiente adimensional da seguinte forma.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 \phi L}$$
(38)

Onde ϕ é o diâmetro do modelo e *L* a envergadura. Este procedimento é semelhante ao método conhecido como Pitot "traverse". Vários autores produziram trabalhos experimentais para avaliar esta força de arrasto. JONNES (1936) estudou o mesmo tema com a correção da pressão estática na esteira.

4.3. Dados dos ensaios com cilindro parado (Túnel de Vento LAE-2)

Os ensaios com o cilindro circular parado foram realizados a uma velocidade de escoamento na câmara de ensaio igual a 2,3 metros por segundo. Desta forma o número de Reynolds, com relação ao diâmetro do modelo, era de 13570. A sonda anemométrica percorria a região de medição em passos de comprimento igual a 2 milímetros, totalizando em cada medição 80 passos. O comprimento transversal

percorrido em cada medição era igual a 0,316 metros iniciando e terminando a uma distância das paredes da câmara de ensaio em que o perfil de velocidades era razoavelmente plano. A seguir são apresentados os resultados em ordem crescente de injeção de massa. Apresentou-se os resultados mais relevantes do efeito da iniecão de massa na redução da esteira.



FIGURA 27 - Esteira do cilindro circular

A Figura 27 apresenta os dados do perfil de velocidades da esteira básica do cilindro parado. Observa-se a grande largura da esteira devido a grande distância da posição onde mediu-se as velocidades. Optou-se por posicionar a sonda a esta distância pois o escoamento podia ser considerado como plenamente desenvolvido. Este fato foi muito importante para os ensaios que, além da esteira, estiveram na configuração com a injeção de massa.



FIGURA 28 - Esteira mais jato V90 do cilindro circular



FIGURA 29 - Esteira mais jato V110 do cilindro circular



FIGURA 30 - Esteira mais jato V120 do cilindro circular



FIGURA 31 - Valores de Cd dos casos estudados do cilindro circular

A Figura 31 apresenta os valores do coeficiente de arrasto resultante para os casos estudados. Pode-se observar a tendência de redução de seu valor com o aumento da injeção de massa. Esta redução ocorre até aparecer um ponto em que o coeficiente de arrasto tem o valor de – 0,12438. Neste ponto pode-se considerar a eliminação total da esteira e o surgimento de uma força de empuxo no cilindro.

	Arrasto (N)	Cd*
Esteira	0,27084	1,394354
V60	0,23297	1,223202
V70	0,13421	0,967878
V80	0,07174	1,064386
V90	0,03923	0,557329
V100	0,08177	0,348423
V110	-0,02896	-0,12438
V120	-0,02789	-0,12468

TABELA 4 – Dados cilindro parado

4.4. Oscilações na esteira

Foram realizadas uma série de tomadas das variações temporais da velocidade nas esteiras geradas pelo cilindro parado, com e sem a injeção de massa. Desta forma estudou-se a influência do jato nas oscilações que ocorrem nas esteiras. Para este ensaio a velocidade do túnel de vento foi mantida no valor de 1,225 metros por segundo, que leva a um valor de número de Reynolds igual a 7227,5. Este é um valor baixo de número de Reynolds o que leva a esteira a estar na faixa em que podem ocorrer oscilações periódicas com uma freqüência definida.
A seguir é apresentada na Figura 32 o resultado obtido para a medida de um ponto na esteira atrás do cilindro parado sem a injeção de massa. Este ponto de medição situava-se em uma região exterior mas próxima da esteira. Pode-se notar a periodicidade da velocidade com o tempo o que implica em uma oscilação com fregüência determinada.



FIGURA 32 – Medida da oscilação na esteira do cilindro parado

A seguir são apresentados uma série de resultados comparando as oscilações da esteira sem injeção de massa com três esteiras com valores crescentes de injeção de massa. Pode-se observar pela Figura 33 e Figura 34 que a presença do jato na esteira reduz significativamente as oscilações quanto à sua magnitude.



FIGURA 33 – Oscilações na esteira com jato V80



FIGURA 34 - Oscilações na esteira com jato V100



FIGURA 35 – Oscilações na esteira com jato V120

Na Figura 35 pode-se ver que o aumento do valor da injeção de massa neste caso foi na direção oposta ao que vinha acontecendo. Ocorreu um aumento da magnitude das oscilações na esteira e de características aparentemente aleatórias. Em princípio, neste regime a injeção de massa perde a eficiência na redução das oscilações na esteira por provocar um grande aumento da turbulência. lsto, no entanto, ainda carece de mais investigação para levar a termo uma conclusão adequada.

4.5. Dados dos ensaios com cilindro o rodando (Túnel de Vento LAE-2)

Para os ensaios com o cilindro rodando foram utilizados basicamente as mesmas configurações usadas para o cilindro circular parado. A velocidade de escoamento na câmara de ensaio era igual a 2,3 metros por segundo, com o número de Reynolds, com relação ao diâmetro do modelo, igual a 13570. Os passos entre cada estação de medição, no total de 80, tinham dimensão igual a 0,002 metros totalizando um comprimento igual a 0,316 metros. As figuras a seguir apresentam os resultados em ordem crescente do valor de injeção de massa. Notase que o perfil de velocidades no lado esquerdo das curvas apresentam valores maiores de velocidade. Isto é devido a velocidade de rotação do cilindro somar-se, em parte, com a do escoamento livre. Este fenômeno é ainda maior com o aumento do valor da injeção de massa, como mostrado a seguir.



FIGURA 36 - Esteira do cilindro rodando



FIGURA 37 - Esteira mais jato V80 do cilindro rodando



FIGURA 38 - Esteira mais jato V90 do cilindro rodando



FIGURA 39 - Esteira mais jato V100 do cilindro rodando



FIGURA 40 - Esteira mais jato V110 do cilindro rodando



FIGURA 41 - Esteira mais jato V120 do cilindro rodando



FIGURA 42 - Valores de Cd dos casos estudados do cilindro rodando

Os dados de coeficiente de arrasto mostrados na Figura 42 mostram também a tendência de redução já observada nos ensaios anteriores. No entanto aqui a redução é muito mais acentuada, apresentando logo no terceiro jato estudado valor negativo. Isto é devido principalmente ao fato de que a rotação do cilindro atrasa em muito a separação da camada limite na parte em que a velocidade devida à rotação é no mesmo sentido do escoamento, formando uma esteira de menor dimensão.

	Arrasto (N)	Cd*
Esteira	0,2327	0,465679
V60	0,15238	0,318101
V70	-0,01064	-0,02673
V80	-0,11354	-0,24131
V90	0,05363	0,117335
V100	-0,12641	-0,2722
V110	-0,29703	-0,66696
V120	-0,65329	-1,5263

TABELA 5 – Dados cilindro rodando

4.6. Anemometria no Túnel de Vento LAE-3

Nesta etapa da avaliação experimental foram realizados ensaios de medição dos perfis de velocidades das esteiras de dois modelos diferentes. Estes eram um cilindro circular e um poliedro quadrado. Este último foi montado em duas configurações diferentes na câmara de ensaio, primeiro com uma das faces principais normal ao escoamento e posteriormente com uma das arestas. Ambos os modelos apresentavam um número de Reynolds, com relação a suas seções transversais, igual a 8260. Os modelos foram montados entre as paredes da câmara de ensaio para que o escoamento se tornasse bidimensional.

O procedimento experimental iniciou-se com a medição da esteira básica e prosseguiu em ordem crescente de valores da injeção de massa. A velocidade da câmara de ensaio foi mantida constante a velocidade de 1,4 metros por segundo. A sonda anemométrica foi posicionada a 0,2 metros de distância a jusante dos modelos. A esta distância pode-se observar pelos resultados que as esteiras sem e com a injeção de massa não estavam ainda plenamente desenvolvidas. Em cada experimento individual foram feitas 100 tomadas de velocidades transversas ao escoamento, sendo de 2,5 milímetros a distância entre elas. São apresentados primeiro os resultados do cilindro circular e posteriormente do poliedro de seção quadrada



FIGURA 43 – Esteira do cilindro circular

67



FIGURA 44 - Esteira mais jato V30 do cilindro circular



FIGURA 45 - Esteira mais jato V45 do cilindro circular





FIGURA 47 - Coeficientes de arrasto para o cilindro circular

	Arrasto (N)	Cd*
Esteira	0,10965	1,05681229
V30	0,09336	0,95821907
V45	0,04642	0,47816877
V50	-0,00401	-0,04273978

TABELA 6 - Dados cilindro circular



FIGURA 48- Esteira do poliedro quadrado





FIGURA 50 – Esteira mais jato V50 do poliedro quadrado



FIGURA 51 - Esteira mais jato V60 do poliedro quadrado



FIGURA 52 - Esteira mais jato V70 do poliedro quadrado



FIGURA 53 - Coeficientes de Arrasto para o poliedro quadrado

	Arrasto (N)	Cd*
Esteira	0,16644	1,609794
V45	0,06747	0,833689
V50	0,0277	0,356752
V60	-0,0148	-0,26418
V70	-0,01661	-0,22659

TABELA 7 – Dados poliedro quadrado

4.7. Medição das forças aerodinâmicas

A seguir são apresentados os resultados das medidas de força utilizando a balança aerodinâmica. Foram realizados apenas os ensaios com o cilindro parado, pois devido a complicações com o excesso de vibrações com o cilindro rodando ficou praticamente impossível a medição. As velocidades usadas variaram entre 5 e 20 metros por segundo. Isto permitiu que os ensaios fossem realizados numa ampla faixa de número de Reynolds. Foi usada esta faixa de velocidades pois foi a melhor que se adequou as condições de medição da balança e limitada pela velocidade máxima controlável do túnel de vento.







FIGURA 55 - Diferença entre Cd provocado por cada jato e Cd da esteira básica.

4.8. Experimento de Visualização

Os ensaios de visualização do escoamento foram realizados em três partes. Primeiro ensaiou-se o cilindro parado, seguido pela visualização do cilindro rotativo e finalizando com uma série de corpos rombudos. Observou-se que a injeção não só atua na redução do tamanho da esteira e a eventual redução do arrasto mas também afeta muito a estrutura da mesma. A seguir é apresentado a seqüência de imagens do experimento de visualização com o cilindro parado. Esta série de experimentos foram realizados com velocidade do escoamento igual a 1,4 produzindo um número de Reynolds igual a 5900.



FIGURA 56 - Cilindro sem injeção de massa

A Figura 56 mostra claramente o regime de escoamento que forma-se na esteira de um cilindro. Aqui pode-se ver o surgimento de um esteira composta de vórtices periódicos. Estes são mais conhecidos por determinar um regime de escoamento onde em certos casos ocorre uma indução de oscilações nos corpos que os formam. Este é o fenômeno que produz, por exemplo, o som dos cabos de alta tensão quando na presença de ventos de certa magnitude. Mas em outros casos produzem a indução de oscilações na faixa de freqüência natural dos corpos que as formam, causando desta forma a destruição destes corpos.



FIGURA 57 – Cilindro com jato V10

Já na Figura 57 pode-se observar o desaparecimento das características da esteira encontrada no caso anteriormente discutido, devido a presença da injeção de massa. Pode-se observar que quase nenhuma alteração foi produzida no tamanho da esteira, o que induz a se afirmar que pouco se reduziu no valor do arrasto. No entanto, o desaparecimento do fenômeno periódico de vórtices, demonstra a eficiência da utilização da injeção de massa na esteira atrás de corpos para o controle da formação de estruturas de escoamento periódicas.



FIGURA 58 - Cilindro com jato V20

A Figura 58 apresenta também a falta de formação de vórtices periódicos na esteira como no caso da Figura 57. No entanto aqui a redução do tamanho da esteira já é observado. Isto foi obtido com um aumento no valor da injeção de massa. Pode-se então obter já dados, no caso visuais, da redução do arrasto através da injeção de massa na esteira. Nas imagens das Figuras 59 e 60 observam-se as mesmas conclusões obtidas com os dados anteriores, com a diferença da constante redução do tamanho da esteira através do aumento no valor da injeção de massa.



FIGURA 59 – Cilindro com jato V30



FIGURA 60 - Cilindro com jato V40

Através das imagens pode-se visualizar que chega-se até o ponto em que a esteira praticamente desapareceu deixando apenas uma região mais próxima logo atrás do cilindro menor, onde é observado a formação de dois vórtices colados. Fora desta região o que se observa é que o jato domina todo o escoamento a jusante. Espera-se, através dos dados visuais, neste regime que o arrasto desapareça por completo dando origem à um empuxo causado pelo jato. Na figura 61 pode-se observar mais de perto o dois vórtices atrás do modelo.



FIGURA 61 – Imagem aproximada dos vórtices

4.9. Visualização com Cilindro Rotativo

Foram realizados uma seqüência de ensaios de visualização com o cilindro rodando para observação do efeito da injeção de massa na esteira deste modelo. O cilindro foi mantido a rotação constante igual a 930 rpm e com a velocidade do escoamento do túnel igual 1,4 metros por segundo. O número de Reynolds era de 5900. A seguir são apresentadas as imagens obtidas neste ensaio. Não se pôde determinar neste ensaio a influência na alteração das estruturas da esteira, como no caso para o cilindro parado. Isto pode ser atribuído ao fato de que com o cilindro rodando, a formação de grandes vórtices fica restrita à superfície inferior. Com isto é reduzindo a magnitude deste fenômeno e também ocorre a eliminação da alternância de formação de vórtices entre a parte superior e inferior do cilindro.



Figura 62 - Cilindro rodando sem jato

Na Figura 62 o cilindro está rodando com as características já descritas e sem injeção de massa. Observa-se que sua esteira não apresenta uma formação de vórtices periódicos como no caso semelhante mas com o cilindro parado. No entanto tal observação só pode ser conclusiva através da obtenção de uma imagem com menor tempo de exposição.



FIGURA 63 – Cilindro rodando com jato V10

Já a Figura 63 apresenta a mesma configuração de rotação e de velocidade de escoamento mas agora com a presença da injeção de massa. Pode-se observar que as características da esteira são as mesmas mas com uma leve redução em

sua dimensão. A seguir é apresentada uma seqüência imagens do cilindro rodando e com a injeção de massa aumentando gradativamente.



FIGURA 64 – Cilindro rodando com jato V20



FIGURA 65 – Cilindro rodando com jato V30



FIGURA 66 - Cilindro rodando com jato V40



FIGURA 67 – Cilindro rodando com jato V50



FIGURA 68 - Cilindro rodando com jato V60



FIGURA 69 - Vista aproximada do cilindro rodando com jato V60



FIGURA 70 - Cilindro rodando com jato V70



FIGURA 71 - Vista aproximada do cilindro rodando com jato V70

4.10. Visualização de outros corpos rombudos

Outras formas também foram experimentadas nos ensaios de visualização. Foram obtidas imagens de dois modelos diferentes. Primeiro um poliedro de seção quadrada com a face ortogonal ao escoamento e depois o mesmo modelo mas com uma de suas arestas voltadas ao escoamento. A seguir montou-se um poliedro de seção triangular com uma de suas arestas ortogonal ao escoamento.

A velocidade do escoamento foi mantida constante em 1,4 metros por segundo o que gerou o valor de número de Reynolds para os modelos, levando em consideração a seção, iguais a 5900 para o modelo de seção quadrada com um dos lados normal ao escoamento, 8169 para o mesmo modelo mas na condição da arestas voltada ao escoamento e 8500 para o modelo de seção triangular. A seguir são apresentados os resultados destes ensaios. Todos os modelos são apresentados em duas configurações, sem e com a injeção de massa em suas esteiras.



FIGURA 72 - Poliedro quadrado sem injeção de massa



FIGURA 73 – Poliedro quadrado com injeção de massa



FIGURA 74 – Poliedro quadrado inclinado sem injeção de massa



FIGURA 75 – Poliedro quadrado inclinado com injeção de massa



FIGURA 76 - Poliedro triangular sem injeção de massa



FIGURA 77 – Poliedro triangular com injeção de massa

Pode-se observar que em todos os modelos ensaiados a redução do tamanho da esteira através da injeção de massa é obtida. No entanto o efeito mais notável é a modificação das características da formação de vórtices em suas esteiras. Observa-se em todos os modelos que enquanto não havia a injeção de massa suas esteiras apresentavam a formação de grandes vórtices descolados que provocavam um 'Deslocamento de vórtices' intenso. Mas quando ocorria a injeção de massa a esteira não apresentava mais estes grandes vórtices. Agora ocorre a formação de um 'Deslocamento de vórtices' de intensidade menor.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Levantamento dos perfis de velocidade

De acordo com o que pode ser visto pelos resultados da anemometria, fica claro que a idéia de reduzir a esteira através da injeção de massa, é um objetivo realizado. Os resultados apresentados, para o cilindro parado e para o cilindro rodando, comprovam que a injeção de massa com certos valores de quantidade de movimento provoca na esteira uma grande modificação de suas características. Esta modificação pode ser uma redução em seu tamanho como pode ser também até a uma esteira 'invertida' com acréscimo de velocidade e não de perda. Isto pode levar ao surgimento de uma força de empuxo caracterizando o desaparecimento da força de arrasto.

5.2. Medidas de Força

Os resultados das medidas de força de arrasto apresentados mostram que o fenômeno de redução de força pela injeção de massa não comporta-se de forma seqüencial. Em outras palavras, fica claro que uma grande redução no valor do arrasto é obtido. No entanto esta redução não é muito mais aumentada mesmo com o acréscimo na injeção de massa. Isto, aparentemente, leva à uma conclusão de

que o fenômeno está mais relacionado com a injeção de um alto nível de turbulência no escoamento. Assim sendo, a camada limite na superfície do modelo tende a transicionar mais cedo do que o esperado, atrasando a separação que é em alguns casos laminar para uma separação, bem mais a frente, turbulenta. Isto representa uma grande diminuição na força de arrasto entre os números de Reynolds 20000 a 30000 e tendendo á um patamar logo após.

5.3. Visualização do escoamento

Através das imagens obtidas pelo ensaio de visualização, fica claro que a redução do tamanho da esteira tanto para o cilindro parado quanto para o rodando é bastante grande. O mais notável aqui é a aparente eliminação dos vórtices periódicos no cilindro fixo. Apenas uma pequena modificação no comportamento do cilindro rodando é notada. No entanto assim que o valor da vazão do jato é aumentada, uma notável diminuição no tamanho da esteira para ambos cilindros é observada. Pode-se aqui concluir que a injeção de massa provoca uma diminuição na pressão estática no escoamento à jusante, fazendo com que o gradiente de pressão na superfície dos cilindros fique menos adverso.

6. CONCLUSÕES

Foram observados uma série de provas experimentais que caracterizaram a injeção de massa em uma esteira como sendo um método eficiente na redução do arrasto em corpos rombudos. Tanto os experimentos de visualização quanto o de medição dos perfis de velocidades mostraram uma redução grande nas dimensões da esteira e uma mudança de suas características. No entanto o experimento de medida das forças de arrasto mostrou que o fenômeno para certos números de Reynolds é provavelmente mais inerente à camada limite. Para os casos de separação laminar o efeito mais significativo para a redução do arrasto está na transição prematura da camada limite, devido ao aumento do índice de turbulência provocada pela presença do jato. Isto leva a um atraso na separação da camada limite com a conseqüente redução do arrasto de pressão. Mas todos estes resultados comprovam que houve de fato uma redução no valor do arrasto de pressão atrás dos modelos estudados.

Os experimentos de anemometria mostram que através da análise da quantidade de movimento nas esteiras fica claro que a injeção de massa atua de forma positiva. Melhor dizendo, a injeção de massa reduz significativamente o arrasto de pressão de corpos rombudos. No entanto os ensaios de medição da força de arrasto deixaram um ponto polêmico. Pode-se ver pelos resultados que a diferença entre os dados da força de arrasto para o caso sem a injeção de massa e os outros com a injeção de massa aumentando é muito grande. Já entre os dados com a injeção de massa aumentando ocorre ainda diminuição no valor da força de arrasto mas não tão significativamente. Pode-se então concluir com base nestes dados que o fenômeno de redução da força de arrasto esta mais relacionada com a presença de qualquer valor de injeção de massa e não com um valor que aumenta seqüencialmente. Apenas a presença da injeção de massa parece ser suficiente para levar a termo uma modificação de grande magnitude nas características do escoamento a jusante, principalmente na esteira dos modelos estudados.

Pode-se também dizer que este método é, do ponto de vista de montagem, muito aconselhável para o uso em aplicações práticas. Dentre elas pode-se citar a redução do arrasto e o controle do 'Deslocamento de vórtices' de pontes, torres altas, chaminés e demais estruturas sujeitas a ação de ventos. Outra aplicação é a implementação do sistema de injeção de massa para a redução do arrasto em aparelhos que pretendam o uso de cilindros rodando (efeito Magnus) melhorando assim a performance atualmente prejudicada pelo alto valor da força de arrasto encontrada nestes casos. Todas estas aplicações práticas irão necessitar de pouca adaptação para a montagem do sistema estudado.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

A contribuição deste trabalho foi mais a de abrir caminho para estudos mais aprofundados sobre a injeção de massa na esteira de corpos rombudos. Muito trabalho experimental e teórico é ainda necessário para determinação completa das influências que um jato com certo valor de quantidade de movimento pode

90

91

causar em esteiras. Neste trabalho alguns ensaios básicos foram realizados, mas muitos pontos obscuros permaneceram. Assim algumas sugestões para futuros trabalhos são propostas a seguir.

- Ensaios com o cilindro circular e outros corpos rombudos para a medição do Cp sem e com a injeção de massa;
- Avaliação experimental das características da camada limite sobre influência da injeção de massa;
- Estudos mais aprofundados sobre a influência da injeção de massa na redução de oscilações na esteira;
- Determinação da influência da injeção de massa na força de sustentação de cilindros rodando;
- Estudo das características necessárias para a implementação do método de injeção de massa para uso em estruturas gerais.

ANEXO A

A.1. Proteção de Estruturas através da injeção de massa na esteira

Um dos fatores limitadoras para a construção de grandes estruturas ao ar livre é que esta está constantemente sujeita a forças geradas pelo escoamento ao seu redor. Deste também tira-se outra condição importante, a de que em alguns casos tais escoamento geram uma esteira de baixa pressão contento a formação de vórtices periódicos que podem induzir uma oscilação na estrutura, as quais em alguns caso podem até provocar a destruição do corpo que a gera. Isto pode ser melhor comprovado com o caso extremo ocorrido no estado norte americano de Omaha, mais precisamente no município de Tacoma, onde uma ponte sofreu durante horas os efeitos de uma esteira de vórtices periódicos, sendo que tal esteira chegou a induzir uma oscilação na freqüência natural da estrutura causando sua destruição.

Mas de acordo com o trabalho aqui apresentado, a injeção de massa na esteira formada atrás de um corpo além de reduzir em muito o arrasto total altera significamente as características desta esteira. Nos casos estudados, quando não havia a presença da injeção de massa na esteira, esta apresentava sua formação normal e com a presença em determinados regimes de formações periódicos. Mas com a injeção de massa, a primeira mudança é a alteração da estrutura da esteira e

até o desaparecimento de vórtices periódicos. A proposta então é a de se acoplar a estruturas prediais um equipamento que possa injetar massa na esteira de tais corpos quando estes estão em escoamentos ao ar livre. Para exemplificar toma-se por exemplo um silo usado para armazenar grãos em propriedades rurais. A Figura 78 mostra a configuração desta estrutura com o equipamento de sopro.



FIGURA 78 - Esquema geral do equipamento de proteção

Pode-se ver que ao redor do silo é montado um equipamento composto de pequenos cilindros, os quais contém fendas para permitir a injeção de massa. Estes cilindros tem a liberdade de movimentarem-se ao redor do silo para se posicionarem sempre dentro da esteira gerado pelo silo. Através destes cilindros é injetado massa na vazão determinada pelas condições necessárias para o efeito de redução ou de controle desejado.



FIGURA 79 - Vista superior do complexo.

A figura 79 mostra a configuração, vista de cima, do equipamento em funcionamento. Com o jato a determinada vazão o resultado que obtém-se é de uma significativa redução na dimensão na esteira e também uma profunda alteração em suas estruturas. A Figura 80 mostra o que acontece com a esteira formada atrás de um cilindro sem e com a presença de injeção de massa. Pode-se ver que a grande esteira formada atrás do cilindro é reduzida em muito quando a injeção de massa através do pequeno cilindro está presente. Também é notado que a formação de grandes vórtices está ausente ou foi afastada para longe do corpo do cilindro.


FIGURA 80 - Visualização do efeito de redução e controle da esteira.



FIGURA 81 - Tensões causadas pelos efeitos aerodinâmicos em estruturas

A Figura 81 ilustra como o efeito da injeção de massa age na redução das tensões pertinentes à estrutura devido à ação aerodinâmica. No lado esquerdo da Figura vê-se o caso sem injeção onde a estrutura submetida à ação do vento sofre tensões devido a região de baixa pressão na esteira e também devido a tensão de cizalhamento que forma-se na superfície da estrutura. Já no lado oposto o cilindro

atrás da estrutura injeta massa e reduz, neste caso idealizado, a zero a influência da esteira deixando apenas uma tensão causado pela tensão de cizalhamento. Mas mesmo se for o objetivo a se alcançar, a tensão de cizalhamento pode ser eliminada com o aumento no valor da vazão do jato, o que então provoca uma força de empuxo no sentido contrário ao do escoamento.

a

ANEXO B

B.1. Remodelagem do túnel de vento LAE-2

Uma das partes deste trabalho consistiu na remodelagem do túnel de vento do laboratório de aeronaves LAE-2. Isto foi feito com intento de se melhorar as características do escoamento na câmara de ensaio para obter condições adequadas aos experimentos propostos. Este túnel de vento é de circuito aberto do tipo N.P.L.. Suas dimensões principais são: comprimento total de 3,86 metros; com a câmara de ensaio com comprimento igual a 0,26 metros, altura de 0,30 metros e largura de 0,35 metros.

Como primeiro passo foi colocado uma nova seqüência de telas uniformizadoras na entrada do túnel de vento. Foram retiradas as telas do modelo original e colocadas cinco novas telas. Ainda na parte frontal às telas foi montado uma colmeia retificadora de madeira onde é montado o bocal de entrada com seções semicirculares. A seqüência de montagem das tela é mostrada na Figura 82.



FIGURA 82 - Nova configuração da entrada do túnel de vento LAE-2

A colmeia retificadora tem a função de produzir um escoamento o mais paralelo possível em relação às suas paredes. No entanto, ela também trabalha como um elemento adicional gerador de turbulência e de aumento das perdas na entrada do efusor do túnel de vento. Mas seu papel é de vital importância para a melhoria das características do escoamento tomando seu uso importante. Na Figura 83 pode-se ver as principais dimensões da colmeia retificadora. A largura *a* e altura *b* dos elementos da colmeia tem a mesma dimensão, igual a 0,08 metros. Como pode ser visto, a colmeia consta de vários elementos de seção quadrada, montadas em uma moldura com as dimensões da entrada do efusor do túnel de vento. A profundidade do conjunto é igual a 0,15 metros.



Vista frontal da Colmeia Retificadora

FIGURA 83 – Dimensões da colmeia retificadora.

Segundo CATALANO (1988), sua função como elemento retificador do escoamento pode ser considerada satisfatória, desde que tenha-se a colmeia perfeitamente alinhada com o escoamento, que em caso contrário provocará deflexões indesejáveis na direção do escoamento da câmara de ensaios e possíveis descolamentos ao longo do difusor. Desta forma um cuidado especial foi tomado no tocante à montagem da colmeia na moldura e sua conseqüente fixação na entrada do efusor do túnel de vento. A Figura 84 mostra a colmeia montada na entrada do túnel de vento.



FIGURA 84 - Colmeia montada no túnel de vento

Outra importante modificação no túnel de vento foi a troca de seu motor, de potência igual a 1 hp, por um novo de 5 hp. Isto foi necessário para compensar o aumento das perdas de carga com a remodelagem da entrada. Ainda, como melhoria no setor de controle, foi ligado ao motor um inversor de freqüência que tornou possível o controle da velocidade do escoamento do túnel com maior precisão.



BIBLIOGRAFIA

r die

- ABBOTT, I. H., Von DOENHOFF, A. E. (1959). Theory of Wing Sections. Nova lorque, Dover.
- ANDERSON, J. D. (1991). Fundamentals of Aerodynamics. Nova lorque, McGRAW-HILL.
- BARKLA, H.M.; AUCHTERLONIE, L.J. (1971). The Magnus or Robins Effect on Rotating spheres. *Journal of Fluids Mechanics*. V. 47, n. 3, p. 437-47.
- BATCHELOR, G. K. (1967). An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press, Londres.
- BIRKHOFF, G., ZARANTONELLO, E. H. (1957). Jets, Wakes, and Cavities. Academic Press Inc, Nova lorque.
- CATALANO, F. M. (1988). Projeto, construção e calibração de um túnel aerodinâmico de circuito aberto tipo N.P.L. de seção transversal hexagonal. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CAMARGO VIEIRA, R. C. (1964). Contribuição ao estudo das aplicações dos cilindros rotativos. São Carlos. 82p. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

DEPARTMENT OF EXTERNAL AFFAIRS (1988). Tecnologia dos transportes: A experiência Canadense. Ottawa. Ontario. Canadá. /folder/

- DUNCAN, W. J., THOM, A. S., YOUNG, A. D. (1970). *Mechanics of Fluids*. Londres, Edward Arnold Ltd.
- FALCONE, A. G. (1985). *Eletromecânica*. Volume 1. São Paulo, Editora Edgard Blüncher.

FLETTNER, A. (1925). The Flettner Rotor Ship. Engieering. P. 117-20, jan.

- GAD-EL-HAK, M., BUSHNELL, D. M. (1991). Separation Control: Review. *Journal* of Fluids Engineering. V. 113, p. 5-30.
- HEFNER, J. N., BUSHNELL, D. M. (1989). Viscous drag reduction via surface mass injection. *AAIA Journal*.
- GOLDSTEIN, S. (1965). *Modern Developments in Fluid Dynamics*. Nova lorque, Dover.
- IGARASHI, T. (1997). Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 69-71,p.141-53.
- JOHNSON, W. (1986). The Magnus effect Early investigations and a question of priority. *International Journal of Mechanics Sciences*. V. 28, n. 12, p.859-72.
- JONES, B. M. (1936). The measurement of profile drag by pitot transverse method. ARC RM, 1688.

LAMB, H. (1932). Hydrodynamics. Londres, Cambridge University Press.

- LANDAU, L. D., LIFSHITZ, E. M. (1959). *Fluids Mechanics*. Nova lorque, Pergamon.
- LAVENDER, T. (1925). Experiments on the flow behind a rotating cylinder in the water channel. *Reports and Memoranda*, mai.

- LUDINGTON, C.T. (1943). *Smoke Stream* : Visualization of air flow. Nova lorque, Editora Coward – McCann.
- MAUNSELL, M. G. (1977). Desenvolvimento, Construção e Ensaios de uma Balança Aerodinâmica. São Carlos. 290p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MODI, V. J.; MOKHTARIAN, F. (1990). Effect of Moving Surfaces on the Airfoil Boundary-Layer Control. *Journal of Aircraft*. V. 27, n. 1, p. 42-50, jan.
- MOORE, D. W. (1957). The flow past a rapidly rotating cylinder in a uniform stream. *Journal of Fluids Mechanics*. V. 2, n. 6, p. 541-50, ago.
- PANTON, R. L. (1996). *Incompressible flow*. Nova lorque, John Wiley & Sons. 2[°] edição.
- POPE, H.; RAE, W. H. (1984). Low-Speed Wind Tunnel Testing. Nova lorque, John Wiley & Sons.
- PRANDTL, L. (1927). The generation of vortices in fluids of small viscosity. *Aeronautical Reprints*, n.20.
- PRANDTL, L., TIETJENS, O. G. (1934). Aplied Hydro- and Aeromechanics. Nova lorque, Dover Publications.
- ROTATING Cylinder Flaps Tested on OV-10. (1971). Aviation Week and Space Technology, V. 95, n. 16, out.
- SCHLICHTING, H. (1968). Boundary Layer Theory. McGraw-Hill Book Company, Nova lorque, 6^a Edição.
- SWANSON, W. M. (1961). The Magnus Effect: A Summary of Investigations to Date. *Journal of Basics Engineering*. ASME 830, p. 461-70, set.

- TENNANT, J. S., JOHNSON, W. S., KROTHAPALLI, A. (1976). Rotating Cylinder for Circulation Control on na Airfoil. *Journal of Hydronautics*, V.11, n. 3, p. 102-5, julho.
- THOM, A. (1926). Experiments on the air forces on a rotating cylinder. *Reports and Memoranda*, n.1018, jun.
- THOM, A. (1926). The pressures round a cylinder rotating in na air current. *Repots* and *Memoranda*, n.1028,nov.

WHITE, F. M. (1991). Viscous fluid flow. 2.ed. Nova lorque, MacGraw - Hill.