

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO

ESCOLA POLITECNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

**TUNEL DE VENTO DE
BAIXA VELOCIDADE**

AUTOR: Ciro Roberto Rodrigues
ORIENTADOR: Eng. Marcos Tadeu Pereira

1989

PROJETO E CONSTRUCAO DE
TUNEL DE VENTO DE
BAIXA VELOCIDADE

Serviço de Bibliotecas
Biblioteca de Engenharia Mecânica

1989

Aos meus pais, ao Eduardo e à Ester.

AGRADECIMENTOS

Minha sincera gratidão a todos aqueles que colaboraram para tornar possível este trabalho. Em especial, ao Eng. Marcos Tadeu Pereira, orientador do trabalho, ao Eng. Nilson, que deu importantes contribuições, e ao Ismael, que trabalhou na construção e montagem do equipamento.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS,	II
SUMÁRIO,	III
LISTA DE TABELAS,	V
LISTA DE FIGURAS,	VI
1. INTRODUÇÃO,	1
2. ESCOLHA DO TIPO DE TÚNEL DE VENTO (estudo de viabilidade),	3
2.1 ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE,	3
2.2 FORMULAÇÃO DO PROJETO,	4
2.3 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS TÚNEIS DE VENTO,	5
2.4 ALGUMAS CONFIGURAÇÕES POSSÍVEIS PARA TÚNEIS DE VENTO DE BAIXA VELOCIDADE,	7
2.5 EXEQUIBILIDADE FÍSICA,	10
2.5.1 Ventilador centrífugo,	10
2.5.2 Câmara de estabilização,	10
2.5.3 Telas,	11
2.5.4 Contração,	11
2.5.5 Seção de testes,	11
3. VENTILADOR CENTRÍFUGO,	12
4. A PRODUÇÃO DE ESCOAMENTO UNIFORME E ESTÁVEL,	19
5. TELAS RETIFICADORAS,	22
6. COLMÉIAS RETIFICADORAS,	25
7. TRECHO ESTABILIZADOR,	27

- 8. CONTRAÇÃO, 28
- 9. SEÇÃO DE TESTES, 36
- 10. SALA DO TÚNEL, 39
- 11. AFERIÇÃO DO TÚNEL DE VENTO, 41
 - OUTROS MÉTODOS, 42
- 12. CONSTRUÇÃO DO TÚNEL DE VENTO, 43
- 13. PERFIL DE VELOCIDADES NA SAÍDA DA CONTRAÇÃO, 46
 - CONCLUSÃO, 46
- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, 53
- ANEXO, 55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COORDENADAS DA CONTRAÇÃO, 29

**TABELA 2 - PLANILHA DE LEVANTAMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADES
NA SAÍDA DA CONTRAÇÃO, 49**

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Túnel de vento fechado, com seção de testes aberta e ventilador axial, 7
- FIGURA 2 - Túnel de vento fechado, com seção de testes fechada e ventilador axial, 8
- FIGURA 3 - Túnel de vento de circuito fechado, com seção de testes fechada, ventilador axial, colméias e telas retificadoras, 8
- FIGURA 4 - Túnel de circuito aberto, com ventilador centrífugo, colméias, telas retificadoras e seção de testes fechada, 9
- FIGURA 5 - Túnel de circuito aberto, com ventilador centrífugo, telas retificadoras, seção de testes fechada e sem difusor, 9
- FIGURA 6 - Túnel de vento de circuito aberto, com ventilador axial, telas retificadoras e seção de testes fechada, 10
- FIGURA 7 - Ventilador centrífugo de pás retas, 13
- FIGURA 8 - Ventilador centrífugo de pás para trás ("backward aerofoil"), 13
- FIGURA 9 - Túnel de vento do NPL, 16

- FIGURA 10 - Contorno geométrico da contração, 35
- FIGURA 11 - Posição dos pontos de leitura de velocidades na saída da contração, 47
- FIGURA 12 - Perfil tridimensional de velocidades na saída da contração, 48
- FIGURAS 13 a 17 - Perfis de velocidade na saída da contração, 50-52

1

INTRODUÇÃO

O túnel de vento é um equipamento muito importante em diversas áreas da Engenharia. Sua utilização mais conhecida é no teste de modelos de aeronaves, nos projetos de Engenharia Aeronáutica, mas esta não é a única aplicação possível. O teste de carrocerias de automóveis já é bastante difundido, buscando geometrias que permitam maiores rendimentos e desempenho. Também pode-se usar este equipamento para análise de superestruturas de navios, que podem estar sujeitas a fortes ventos, devendo, no entanto, manter sua estabilidade e integridade. Estruturas imóveis, tais como edifícios, torres ou pontes, também podem ter modelos ensaiados em túnel de vento. Outras áreas onde túneis de vento são utilizados são no teste, aferição e calibração de instrumentos medidores de velocidade e em estudos de camada limite e turbulência.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o projeto e a construção de um túnel de vento de pequeno porte, com baixas velocidades e baixa turbulência. Este tipo de equipamento serve para a aferição de instrumentos de medição de velocidade do ar, tais como anemômetros de fio ou filme quente, velômetros, anemômetros de pás, anemômetros de copo

2

e tubos de Pitot de configuração não usual, além de permitir alguns estudos sobre o escoamento ao redor de corpos.

No caso deste projeto, o túnel é de tamanho adequado apenas para a aferição de instrumentos de pequeno porte, dadas as dimensões pequenas da seção de testes, mas sua finalidade principal é a de servir como modelo-protótipo de um túnel maior, mostrando alguns detalhes construtivos.

Como parte do trabalho é apresentado um mapeamento simples de velocidades na seção de saída da contração, para uma verificação da uniformidade do escoamento neste trecho.

A descrição das diversas partes componentes do túnel apresentará as características construtivas e as funções executadas, sem entrar em detalhes quanto aos fenômenos físicos envolvidos.

2

ESCOLHA DO TIPO DE TÚNEL DE VENTO

(estudo de viabilidade)

2.1 ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE

Para efetuar a aferição de diversos instrumentos, tais como anemômetros de fio, filme quente e de pás, é necessário a utilização de um túnel de vento que tenha um escoamento uniforme, eventualmente um baixo nível de turbulência e que permita uma fácil obtenção de velocidades variando desde 0,1 até 45 m/s.

Com este objetivo, o Laboratório de Medidas de Vazão, da Divisão de Engenharia Mecânica do IPT, iniciou o projeto de um túnel de vento, que terá ao redor de 8 m de comprimento e seção de testes de 0,5 m x 0,5 m, procurando atingir as características acima citadas.

A construção de um túnel de vento, de menores dimensões de modelo para o túnel do IPT, é o objetivo deste trabalho. Este túnel deverá fornecer experiência sobre dimensões, detalhes de construção e operação, visando o túnel maior, além de ser usado posteriormente para aferição de alguns instrumentos, estudos de camada limite e experiências com pequenos modelos. Particularmente, servirá para guiar o projeto de uma região crítica do túnel maior, que é a con-

tração, o que será verificado através do mapeamento das velocidades na saída da contração, o que fornece uma "imagem" do escoamento logo à entrada da seção de testes, verificando a uniformidade do escoamento de ar produzido pelo túnel.

2.2 FORMULAÇÃO DO PROJETO

Para que o túnel atenda satisfatoriamente às necessidades citadas, ele deve ter as seguintes características:

- baixo nível de turbulência.
- perfil de velocidades uniforme na seção de testes.
- razão de contração semelhante ao túnel do IPT.
- facilidade de construção.

A razão de contração de um bocal convergente é definida como sendo a relação entre a área de entrada e a área de saída do bocal. No caso dos túneis de vento, o bocal convergente, à montante da seção de testes, pode ser chamado simplesmente de contração.

Para a manutenção de baixa turbulência, o uso de um ventilador adequado é um fator muito importante, sendo discutido o uso de ventiladores centrífugos com esta finalidade em capítulo posterior.

A seção de testes deve ser ligeiramente divergente, a fim de evitar efeitos indesejáveis devido ao desenvolvimento da camada limite junto às paredes deste trecho do túnel. Para este túnel de vento, o ângulo de divergência é cerca de 1° .

A configuração de túnel de vento do IPT já estava determinada ao início deste trabalho, definindo portanto, a configuração para o túnel descrito.

2.3. CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS TÚNEIS DE VENTO

Quanto ao trajeto percorrido pelo ar, existem basicamente duas concepções possíveis para túneis de vento:

- a) de circuito aberto
- b) de circuito fechado.

O túnel de circuito fechado (figuras 1, 2 e 3), conhecido como de tipo "Prandtl", "Göttingen" ou "return flow" tem, como indica o nome, um caminho para o retorno do ar. O túnel de circuito fechado tem a vantagem de redução das instabilidades geradas devido às condições de entrada e eliminação do problema de poeira no ar movido, em relação aos circuitos abertos, porém têm um desenho e construção mais complicados e dispendiosos.

Túneis de circuito fechado com seções de testes menores que cerca de $0,2 \text{ m}^2$ são incomuns, sendo que um dos poucos exemplos seriam os túneis de pesquisa para anemômetros de fio quente, para os quais ar limpo é necessário e o arranjo de circuito fechado é, portanto, virtualmente essencial, a menos que a sala do túnel possa ser mantida muito limpa.

O túnel de circuito aberto (figuras 4, 5 e 6), também chamado de tipo "Eiffel" ou tipo "NPL", tem o retorno de ar não dirigido. Se o túnel retira o ar diretamente da atmosfera, ar inteiramente fresco será usado. A maioria dos

túneis de vento com seção de testes menor que 0,6 m de diâmetro é deste tipo. Este tipo de túnel ocupa, em geral, um espaço maior que um túnel de circuito fechado correspondente e são sensíveis a correntes e obstruções na sala do túnel. O túnel de circuito aberto tem como circuito de retorno a própria sala do túnel, o que pode gerar assimetrias e desbalanceamentos na seção de testes devido à existência de móveis e pessoas na sala.

No entanto, exceto pelas dificuldades associadas com o escoamento de retorno através da sala do túnel, não há nenhuma razão intrínseca pela qual um túnel de circuito aberto deva ter um desempenho ruim, podendo a qualidade de escoamento na seção de testes pode ser tão boa quanto a do túnel de circuito fechado.

De modo geral, podemos dizer que, para uma dada eficiência, um túnel de circuito aberto é construído a mais baixo custo que um túnel de circuito fechado. No entanto, um túnel de circuito fechado tem melhor escoamento e fator de potência (relação entre potência de entrada e escoamento de energia cinética na seção de testes).

Os túneis podem também ser classificados quanto à velocidade obtida na seção de testes em:

1. subsônicos ($M < 1$).
2. sônicos ($M=1$).
3. supersônicos ($1 < M < 3$).
4. hipersônicos ($3 < M < 7$).

O túnel apresentado neste trabalho é subsônico, de baixa velocidade. Neste tipo de túnel os fatores predominantes são a inércia e a viscosidade, adotando-se o número de Reynolds (Re) como parâmetro de maior importância para ca-

racterização do escoamento. O número de Mach (M) é, neste caso, menor que 0,3. Nos túneis de alta velocidade predominam os efeitos de inércia e compressibilidade, adotando-se o número de Mach como parâmetro de maior importância.

Finalmente, uma terceira classificação diz respeito ao formato da seção de testes. Pode-se ter seções transversais quadradas, retangulares, octogonais, circulares ou elípticas. O jato de ar na seção de testes pode ser fechado, quando o escoamento dentro da seção de testes é limitado por paredes sólidas, ou aberto (jato livre), quando a seção de testes é simplesmente um espaço aberto entre o cone de entrada (contração) e o de saída (difusor).

2.4 ALGUMAS CONFIGURAÇÕES PARA TÚNEL DE VENTO DE BAIXA VELOCIDADE

FIGURA 1

Túnel de vento fechado, com seção de testes aberta e ventilador axial

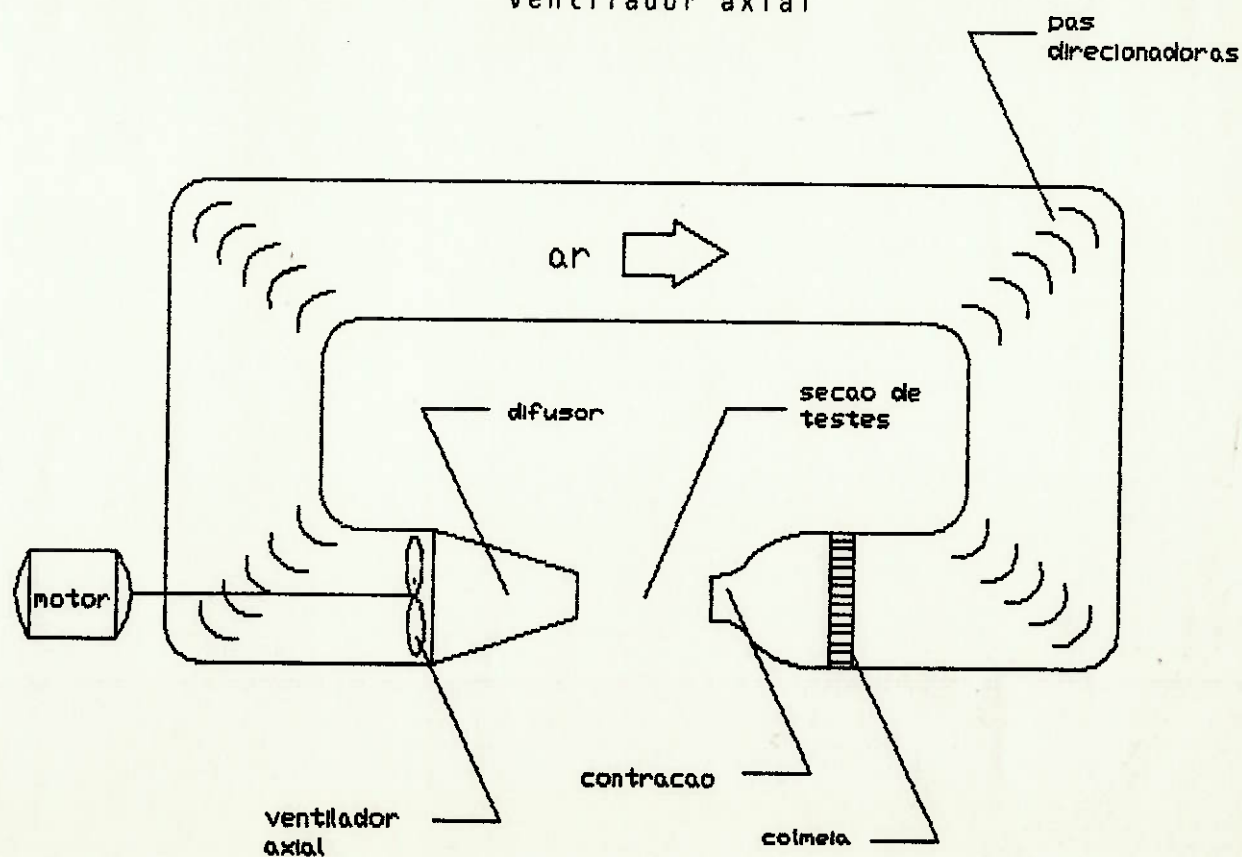


FIGURA 2

Túnel de vento fechado, com seção de testes fechada e ventilador axial

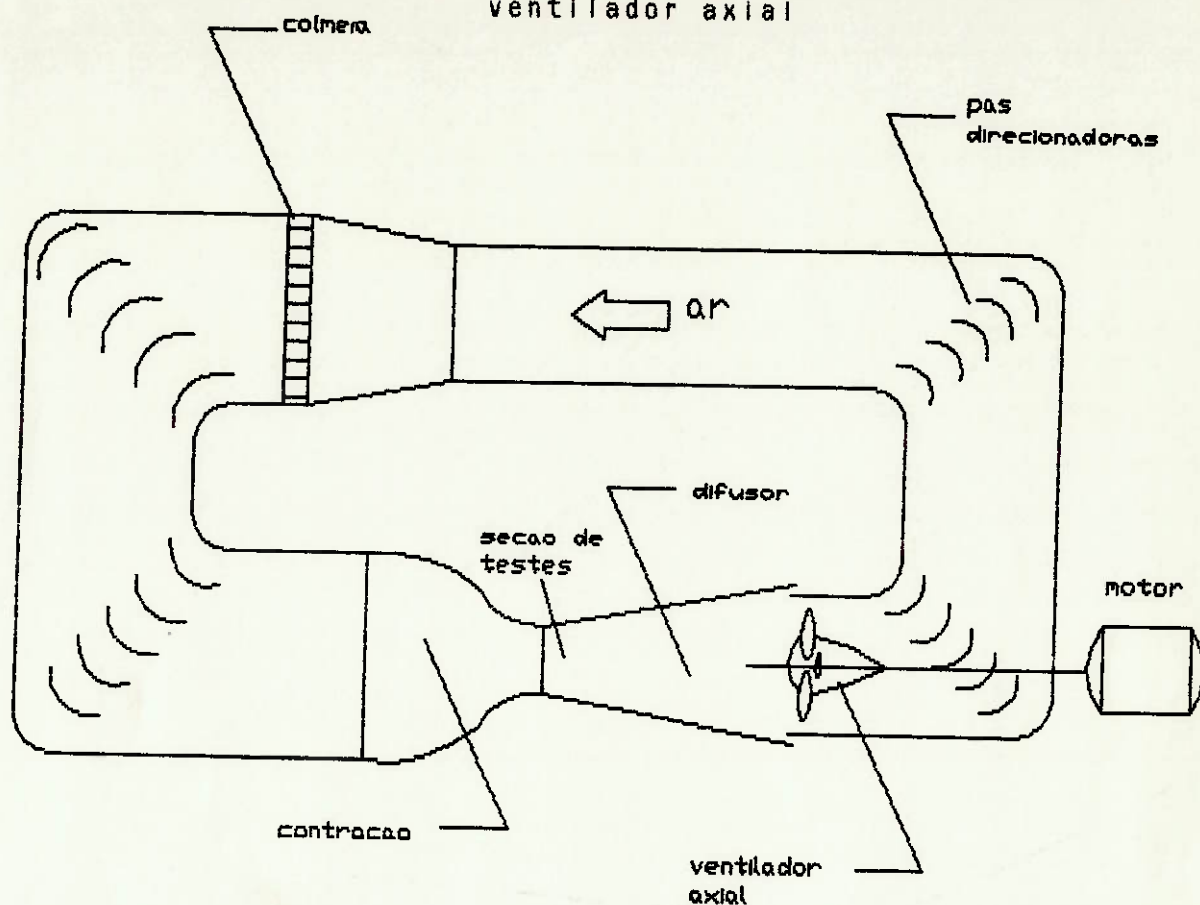


FIGURA 3

Túnel de vento de circuito fechado, com seção de testes fechada, ventilador axial, colméias e telas retificadoras

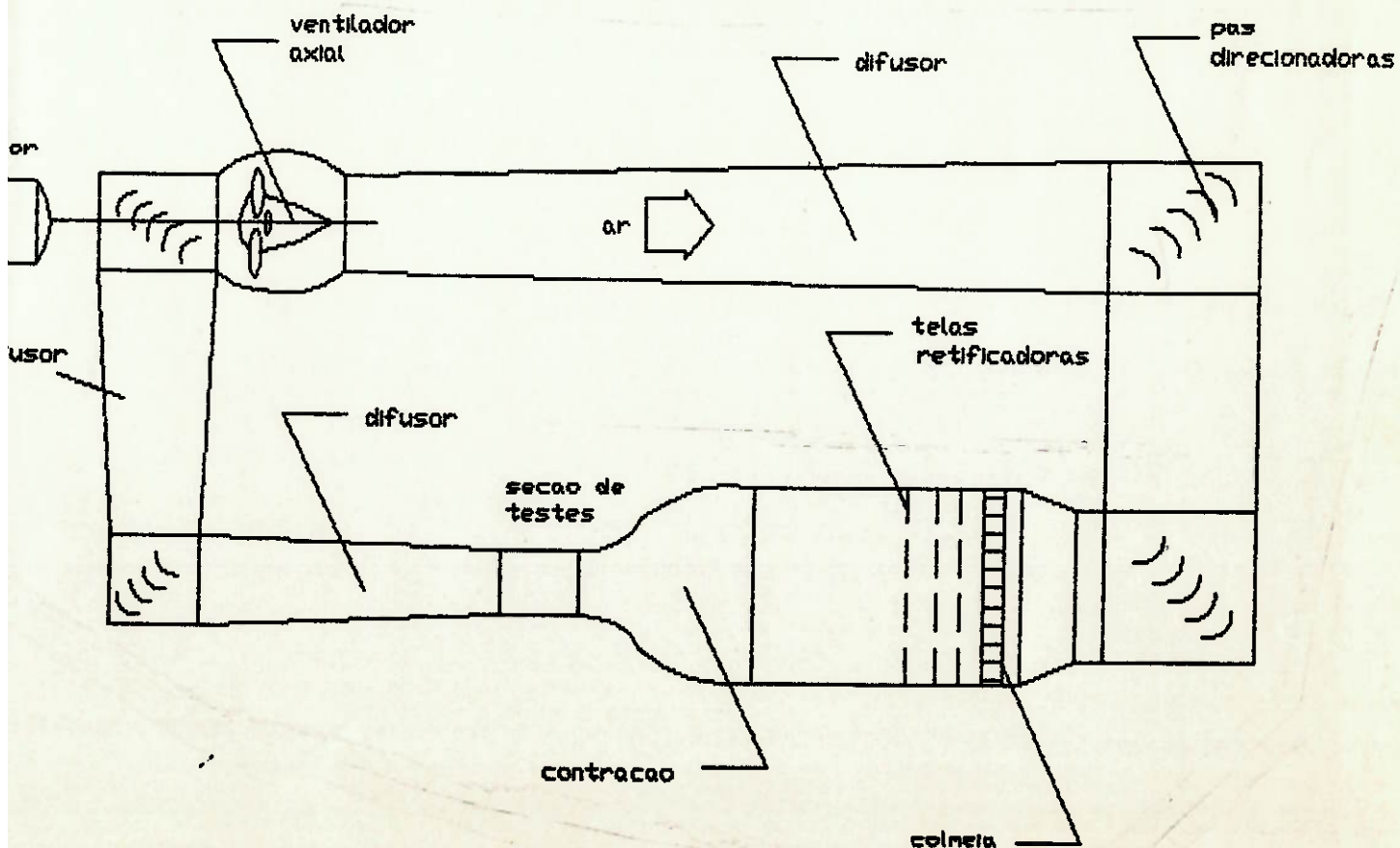


FIGURA 4

Túnel de circuito aberto, com ventilador centrífugo, colméias, telas retificadoras e seção de testes fechada

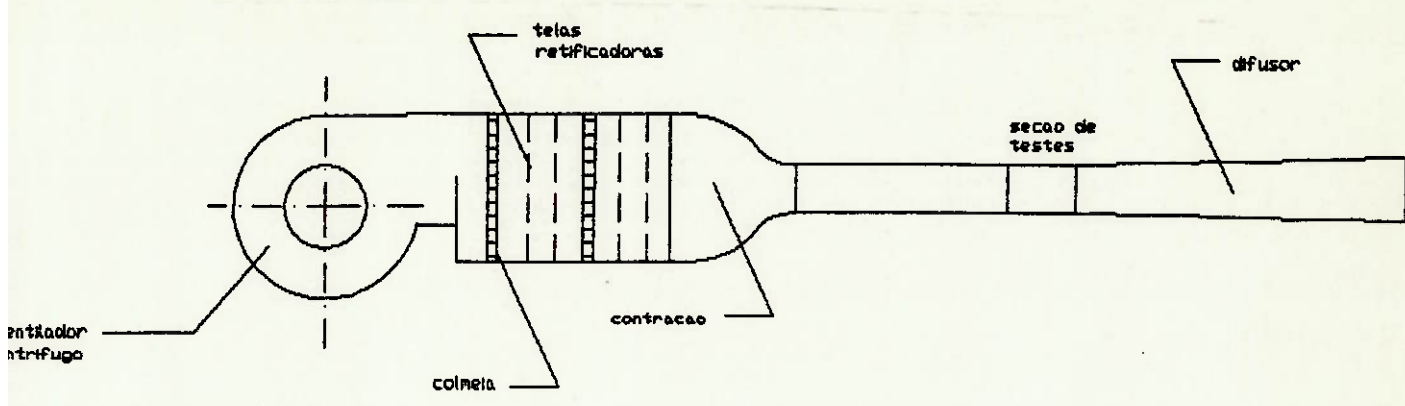


FIGURA 5

Túnel de circuito aberto, com ventilador centrífugo, telas retificadoras, seção de testes fechada e sem difusor

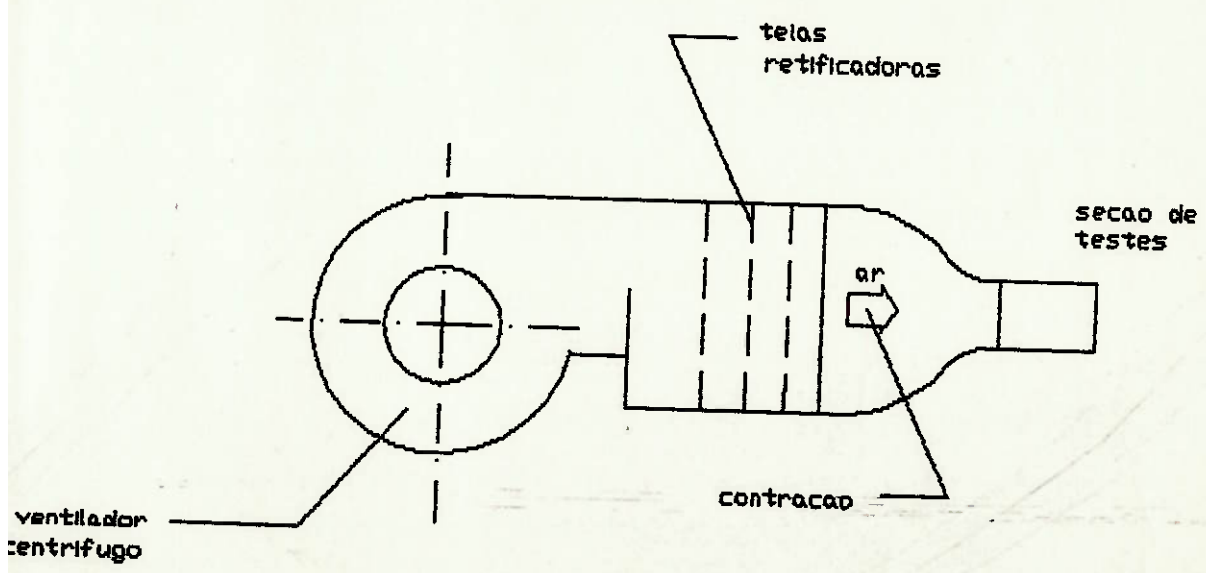
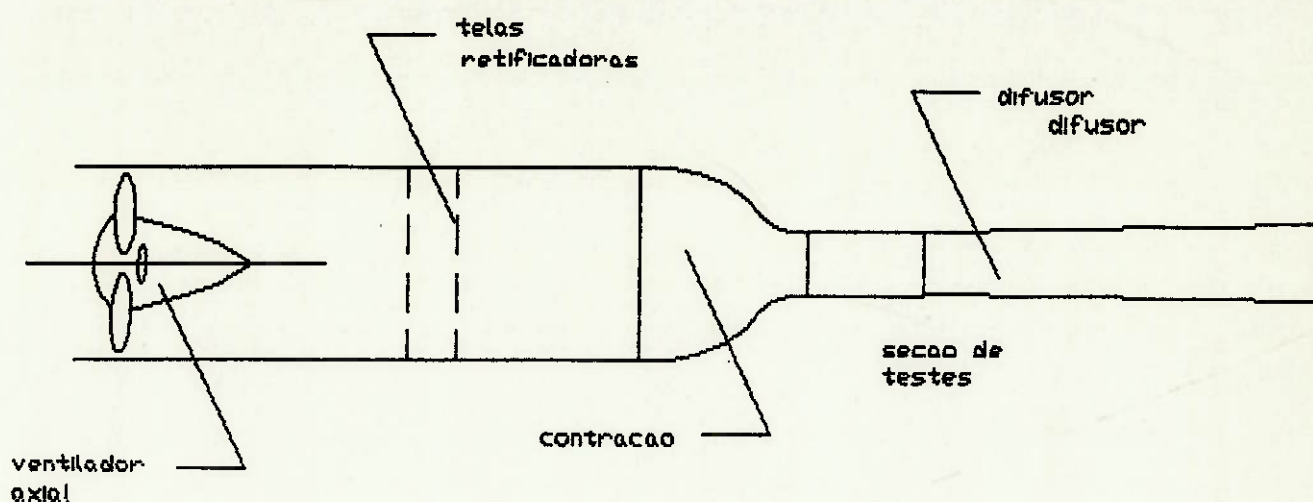


FIGURA 6

Túnel de vento de circuito aberto, com ventilador axial, telas retificadoras e seção de testes fechada



2.5 EXEQUIBILIDADE FÍSICA

Devido ao fato do túnel já ter sua configuração determinada, não serão analisadas aqui outras soluções que não a escolhida. Serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados na construção do túnel modelo. Em capítulo posterior será apresentada justificativa para a sua utilização.

2.5.1 Ventilador centrífugo - já existente no Laboratório de Medidas de Vazão do IPT. É do tipo "backward aerofoil", utilizado em aplicações de ar condicionado e bastante silencioso, o que pode garantir baixa turbulência do escoamento.

2.5.2 Câmara de estabilização - também já existente no Laboratório, acoplada ao ventilador. Montada em chapas de aço, tem seção transversal quadrada, com 480 mm de

lado, e comprimento de 690 mm. Tem suas extremidades flangeadas para o acoplamento de outros equipamentos.

2.5.3 Telas - dentro da câmara existem três chapas de aço, perfuradas com fileiras de furos de 6 mm de diâmetro, perfazendo um total de 40% de área livre para a passagem de ar através da placa. Juntamente com a câmara, seu objetivo é estabilizar o escoamento de ar para a entrada da contração, diminuindo a turbulência do escoamento proveniente do ventilador.

2.5.4 Contração - o cálculo do perfil da contração é feito por um programa de computador. Este programa é apresentado em capítulo posterior, que descreve mais detalhadamente a contração. Esta é feita em chapas de PVC, com 3 mm de espessura, soldadas umas às outras. Sua fixação à câmara de estabilização é feita através de flange e parafusos.

2.5.5 Seção de testes - executada também em PVC, e fixada à contração por flange, semelhante àquela que une a contração e a câmara de estabilização. A seção de testes é removível, permitindo trabalhar-se com o túnel em jato livre.

3

VENTILADOR CENTRÍFUGO

Muitos dos problemas aerodinâmicos e de construção dos túneis de vento abertos convencionais podem ser evitados, nos de pequeno tamanho, pelo menos, através do uso de um ventilador centrífugo comercial na entrada do túnel.

Dentre os vários tipos de ventiladores centrífugos, dois tipos de pás são mais comumente utilizadas: os de pás radiais e os de pás com formato de aerofólio.

O ventilador com pás radiais fornece o ar de modo descontínuo atuando, portanto, como uma sirene. O ruído resultante e as flutuações no escoamento tornam-no inadequado para o uso em túneis de vento de alto desempenho.

Nos meados dos anos 60, fabricantes de ventiladores para sistemas de ventilação e ar condicionado começaram a abandonar o arranjo tradicional de pás radiais retas mostrado na figura 7, para o arranjo com pás voltadas para trás, em forma de aerofólio ("backward aerofoil") mostrado na figura 8. Ao contrário do tipo antigo, o ventilador com pás em formato de aerofólio não depende da "força centrífuga" para produzir um aumento de pressão, embora dependa do aumento na velocidade periférica da pá da entrada para a saída.

FIGURA 7

Ventilador centrífugo de pás retas

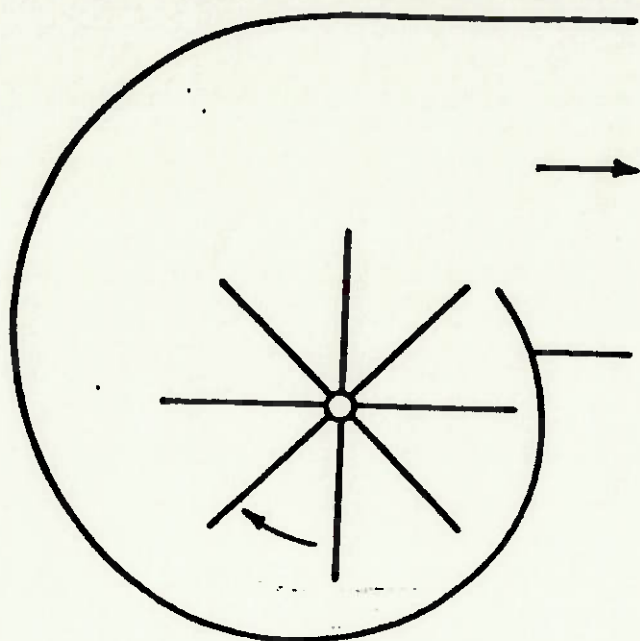
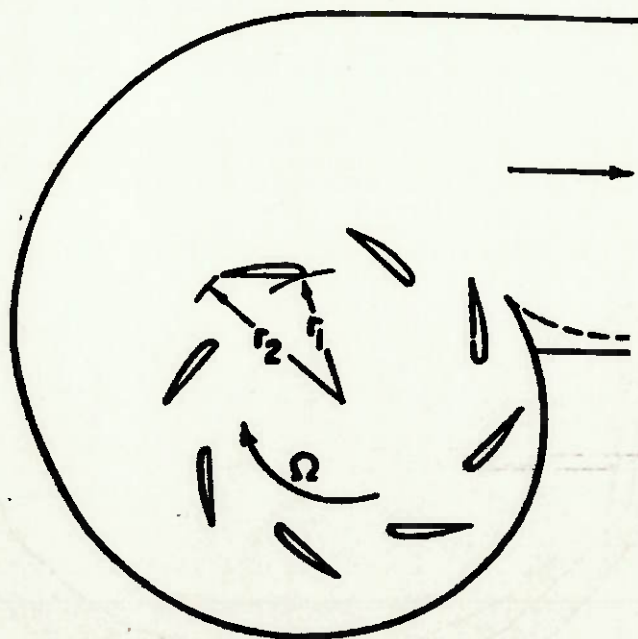


FIGURA 8

ventilador centrífugo de pás para trás ("backward aerofoil")



O tipo mais apropriado é o "backward aerofoil", bastante silencioso. Este tipo de ventilador é preferível em relação a um axial em algumas situações e aplicações:

1. Quando se vai utilizar o túnel em uma larga faixa de condições de operação, o ventilador centrífugo é mais favorável porque como toda a área das pás está na periferia do rotor, o aumento de pressão que se obtém para uma dada velocidade periférica e condições de operação das pás é maior que em um ventilador axial.
2. Como todas as pás operam com o mesmo coeficiente de sustentação, uma operação eficiente e em regime permanente pode ser esperada em uma larga faixa de velocidades, maior que no caso do ventilador axial com um diâmetro do cubo central aceitável para uso em túnel de vento, que produz "stall" (perda de sustentação em um aerofólio) na raiz das pás e empuxo negativo primeiro nas pontas das pás, gerando instabilidades em determinadas faixas de velocidade.
3. Das condições 1 e 2 segue que o ruído num ventilador centrífugo tipo aerofólio com pás curvadas para trás é menor que num ventilador axial, particularmente em condições fora do projeto.
4. Segue de 2 que a uniformidade de escoamento na saída não se altera tanto com a variação de velocidade como no caso de ventilador axial. Particularmente, o escoamento rotacional na

saída é pequeno, comparado com o grande rotacional, dependente da velocidade, gerado nos axiais. Isto é particularmente útil para túneis com o ventilador centrífugo instalado a montante da seção de testes, como os usados para pesquisa de camada limite.

Como um exemplo padrão para este tipo de túnel será descrito sucintamente o túnel desenvolvido pelo NPL. O NPL, National Physics Laboratory, é um instituto inglês que desenvolveu diversas pesquisas na área de Aerodinâmica.

O túnel, visto na figura 9, foi desenvolvido para estudos de camada limite e possui as seguintes características:

- a) Seção de testes: 380 x 250 mm
- b) Velocidade máxima: 50 m/s
- c) Número de Reynolds máximo: $3,3 \times 10^6$
- d) Potência: 7,5 HP
- e) componente turbulenta da velocidade axial: 0,05%

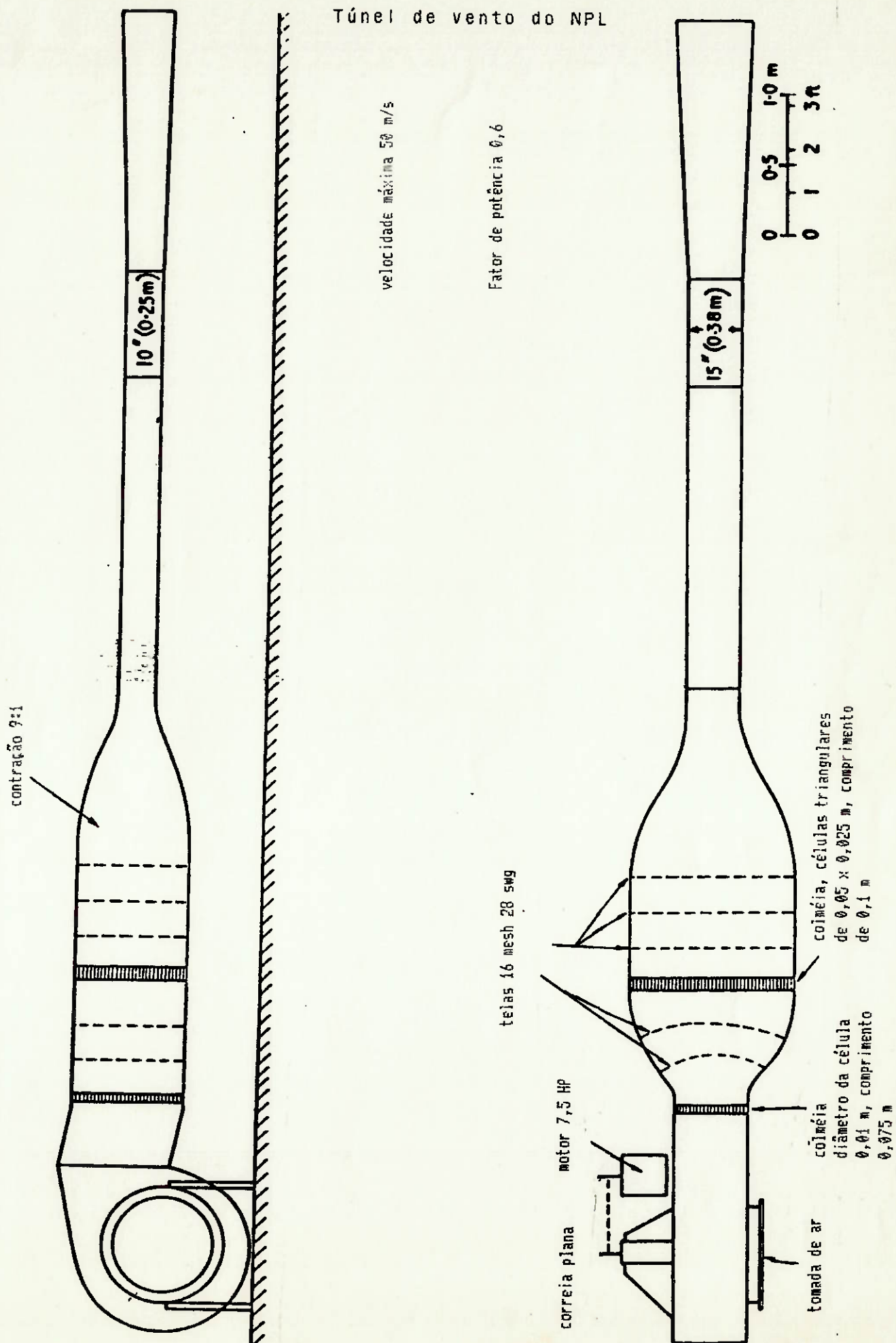
Este modelo usa um tipo convencional de difusor com ângulo bem aberto, com uma colméia retificadora na entrada e três telas, sendo que provavelmente o conjunto poderia trabalhar sem tantos artifícios retificadores.

A perda de pressão entre a saída do ventilador e a seção de testes é de 0,12 vezes a pressão dinâmica na seção de testes.

O escoamento na saída do ventilador está longe de ser uniforme: é assimétrico porque a largura do rotor é só aproximadamente a metade da largura da voluta envoltória na carcaça. A não uniformidade no plano vertical é parcialmente atribuível ao desenho da placa do bordo de fuga do ventila-

FIGURA 9

Túnel de vento do NPL



dor, o que pode ser melhorado usando-se um ventilador do tipo mostrado na figura 8. A uniformidade do escoamento na seção de testes é de um padrão muito alto, de modo que não houve necessidade de modificar o ventilador ou ajustar algum bocal de entrada.

Importante notar que o escoamento sai do ventilador com uma inclinação de 10° a 15° , o que sugere que o ventilador deva ser montado inclinado, para que a direção do escoamento coincida com a linha de centro do túnel, mas de qualquer forma não se notou nenhuma inclinação após a segunda colméia.

O túnel do NPL é bastante silencioso e o ruído fora da seção de testes é dominado pela radiação das camadas limites na seção de testes. A velocidade periférica das pás do ventilador é ligeiramente maior que a velocidade na seção de testes. O espectro das flutuações de pressão e de velocidade não mostraram traços de frequência da passagem das pás.

Adicionalmente, é afirmado na literatura que uma performance equivalente de um bom túnel de circuito fechado pode ser conseguida muito mais facilmente com o ventilador centrífugo que com um ventilador axial à jusante da seção de testes.

A área de saída do ventilador deve ser 2 a 3 vezes maior que a área da seção de testes e é aconselhável instalar um difusor com ângulo bem aberto, com telas e uma contração bastante grande, ao invés de somente usar uma razão de contração de 2 ou 3 para 1.

Se a altura da saída do ventilador for maior que a sua largura, o difusor pode ser feito bidimensional para facilitar a construção.

Com estas considerações, o mais apropriado parece ser o uso de ventiladores centrífugos no túnel de vento, e foi esta a configuração adotada.

O ventilador utilizado para acionar o túnel descrito neste trabalho é do tipo centrífugo, de pás para trás, com um rotor de cerca de 450 mm de diâmetro, bocal de sucção de 260 mm de diâmetro, largura do rotor de 180 mm, aproximadamente, e boca de saída de 360 x 180 mm. A vazão de saída é controlada pelo uso de uma placa de PVC junto ao bocal de entrada: quanto mais próxima do bocal, menor a vazão de saída e, como a área da boca de saída é constante, é menor a velocidade na saída do ventilador. Controlando esta característica do sistema, pode-se ter um controle do túnel, mesmo que inexistente, operando em algumas faixas distintas de velocidade. O ventilador é acionado por um motor trifásico de indução, com potência de 1,5 CV e rotação de 1725 rpm.

4

**A PRODUÇÃO DE ESCOAMENTO
UNIFORME E ESTÁVEL**

A distinção entre instabilidade e turbulência num escoamento é subjetiva, mas usualmente corresponde a uma distinção entre as fontes das irregularidades.

A instabilidade pode ser entendida como uma flutuação de velocidade de frequência suficientemente baixa que pode ser percebida em manômetros e é normalmente um sintoma de separação de escoamento ou separação intermitente, como por exemplo o que ocorre num difusor com um ângulo de expansão muito grande ou numa contração excessivamente curta. Uma separação intermitente pode ser disparada pela passagem ocasional de um vórtice "turbulento" particularmente intenso, de maneira que flutuações muito lentas de velocidades podem ocorrer com frequências muitas vezes menor que aquelas que contém a maior parte da energia de turbulência. Como o escoamento inteiro é defletido pela espessura de deslocamento da camada de atrito, as flutuações podem ser vistas como invíscidas e irrotacionais.

Outra fonte de turbulência é o som, causado por:

1. Vibração mecânica, geralmente na frequência de rotação do eixo do ventilador;

2. excitação dipolar das pás do ventilador, causada por escoamento espacialmente não uniforme, na frequência das pás.
3. excitação dipolar das pás fixas e painéis, causada por instabilidades e turbulências, num espectro largo de frequências;
4. emissão quadripolar de turbulência, sem excitação de qualquer fronteira sólida. Esta fonte é pequena quando comparada com outras fontes de som em túneis de baixa velocidade.

Aliada à causa 3, está a flutuação de pressão das camadas limite turbulentas na seção de teste, que produzem flutuações de velocidades invíscidas dentro da camada limite das paredes. Deve ser notado que túneis com paredes de concreto ou metal têm um tempo de reverberação extremamente longo, de maneira que a intensidade do som produzida por uma dada fonte de potência sonora pode ser muito alta, mas algumas áreas de material absorvente, mesmo que pequenas, podem diminuir consideravelmente a intensidade do som. Ressonâncias do tipo "tubo de órgão" em dutos também ocorrem com facilidade em túneis de vento. Turbulência, ou mesmo flutuação de vorticidade, podem ser geradas pelas camadas limite das paredes, assim como pelas esteiras ("eddies") de pás de ventiladores, pás fixas e colméias e telas, embora se use o termo turbulência para indicar todos estes fenômenos de instabilidade.

A não uniformidade espacial da velocidade média pode ser causada por:

1. crescimento da camada limite, com separações, causadas por difusor com ângulo muito aberto

ou desenho ruim das cantoneiras, resultando em um escoamento com distribuição assimétrica de velocidades;

- 2. projeto ruim da colméia e telas retificadoras, o que resulta em assimetria e escoamentos preferenciais por certas regiões;
- 3. mau posicionamento do ventilador centrífugo, com escoamento inclinado na boca do ventilador.

Em um túnel de alta performance os valores aceitáveis para variações de velocidade média situam-se entre 0,2% e 0,1%, cerca de 4 vezes o valor RMS das flutuações turbulentas, o que significa que o projeto para baixa turbulência automaticamente assegura velocidade média com uniformidade adequada. Num túnel de aferição de medidores, por exemplo, a turbulência pode ser de importância menor e o projeto do túnel vai ser regido pela necessidade de uniformidade da velocidade média, mas as técnicas para reduzir turbulência e variações espaciais são muito similares.

Instabilidade e turbulência da seção de teste podem ser evitadas ou atenuadas através da instalação de colméia e telas retificadoras e de uma grande contração à montante da seção de testes, ou ainda melhorando o escoamento no circuito de retorno (a sala do túnel).

O túnel que foi construído de acordo com o presente projeto apresenta uma uniformidade satisfatória no perfil de velocidades à saída da contração. Detalhes quantitativos sobre este perfil são apresentados, em forma de tabelas e gráficos, em capítulo posterior.

5

TELAS RETIFICADORAS

Embora colméias reduzam as variações espaciais de velocidade axial, uma tela feita de fios de lã é muito mais eficiente para este propósito: sem dúvida, a eficiência de uma tela ou colméia para reduzir variações longitudinais de velocidade dependem simplesmente da sua perda de carga e não dos detalhes de fabricação. As telas particularmente não são muito eficientes para remover vórtices e variações de velocidade média lateral, para o que colméias, de comprimento igual a 6 ou 8 vezes o diâmetro da célula são preferíveis, desde que o ângulo de incidência do escoamento não seja superior a 10° .

Uma tela com coeficiente de perda de carga de aproximadamente 2, a 9 m/s (como por exemplo, a de 20 fios por polegada, com fio 28 SWG) elimina quase completamente variações de velocidade axial. Embora o coeficiente de perda de carga seja muito superior a 2 em velocidades muito baixas, a eficiência da tela é apenas levemente reduzida.

Para retificação completa abaixo de 1,5 m/s, um conjunto de duas ou três telas espaçadas de poucos centímetros é suficiente.

Telas com relações de área livre menores que 0,57 (por exemplo, 16 fios por polegada, com fio 28 SWG) e com

coeficientes de perda de carga maiores que 1,6 (medido a 9 m/s) introduzem pequenas variações direcionais. O coeficiente de perda de carga K da tela é função da relação de área e do número de Reynolds baseado no diâmetro do fio e na velocidade através dos furos.

É importante assegurar que a malha de todas as telas sejam razoavelmente uniformes e que estejam em boas condições de limpeza.

As esteiras geradas nos fios das telas tornam-se turbulentas se o número de Reynolds baseado no diâmetro do fio e na velocidade através dos furos for maior que 80. Para uma tela de 30 mesh, que significa um diâmetro de 0,267 mm, teríamos uma velocidade de entrada na tela de cerca de 2 m/s. Estas esteiras tendem a decair a um nível quase imperceptível na seção de testes.

Batchelor mostrou que a redução das flutuações turbulentas pelas telas aumenta monotonicamente com K , o coeficiente de perda de carga, para a componente u e tem um máximo para aproximadamente $K = 4$ para a componente v . As telas com coeficientes de perda de carga muito maior que 2 têm, geralmente, alguma não uniformidade no tecido, o que se torna ainda pior para telas com fios pouco espaçados: não somente piora a distribuição da velocidade média, como há geração de turbulência pela mistura das camadas limites de regiões com velocidades diferentes, além de possível instabilidade das múltiplas camadas limites.

O efeito de telas múltiplas somente será sentido se elas forem montadas distantes entre si o suficiente para que as esteiras dos fios de uma tela decaiam antes que a próxima tela seja alcançada.

Telas com coeficientes de perda de carga entre 2 e 3 eliminam quase que completamente variações de velocidade média axial, porém telas com coeficientes de perda de carga maiores que 1.6 tendem a introduzir perturbações no escoamento, devido à instabilidade no escoamento através dos poros da tela, de maneira que é preferível usar diversas telas, cada uma com um coeficiente de perda de carga pequeno, a usar um única tela com grande perda de carga.

Durante a fase de projeto do túnel de vento deve-se pensar na possibilidade de se instalar novas telas, retirar as existentes e efetuar mudanças de posição.

Neste projeto não foram utilizadas telas como as descritas acima. Existem dois conjuntos de três telas metálicas dentro das câmaras de estabilização, que estão posicionadas a montante da contração. Cada uma destas telas é formada por uma placa metálica, de dimensões iguais a 480 mm x 480 mm, com fileiras de furos de 6 mm de diâmetro, perfazendo uma área livre de 40% do total, isto é, cerca de 0,09 m².

6

COLMÉIAS RETIFICADORAS

A colméia retificadora é uma rede de tubos curtos, geralmente de formato hexagonal, montados sem folga, com eixos na direção desejada da corrente. Se o comprimento da célula for de menos de pelo menos 6 a 8 diâmetros equivalentes do tubo, ela tem um índice refrativo muito maior que uma tela com o mesmo coeficiente de perda de carga K, desde que o escoamento de entrada esteja inclinado com menos de 10° ou 15° em relação ao eixo. Com ângulos de inclinação maiores, o coeficiente K, que normalmente varia ao redor de 0.5, aumenta muito devido à separação do escoamento nos bordos de fuga das células e o escoamento de saída torna-se acentuadamente não uniforme. É necessário, por isso, ter-se um bocal de entrada tipo "Bellmouth" ou uma tela retificadora à montante da colméia para assegurar ângulos pequenos de entrada, se for utilizado um túnel com ventilador axial a jusante da seção de testes. No caso de um túnel que utilize um ventilador à montante das colméias e telas não existe propriamente nenhum bocal de entrada.

Olhando do ponto de vista prático, a colméia não vai reduzir as variações de velocidade axial de modo apreciável, e sua eficiência para eliminar variações direcionais, que vem a ser o principal motivo para o uso das col-

méias, é limitada pela qualidade da manufatura e instalação: imperfeições de acabamento podem prejudicar o escoamento. Considera-se como aconselhável seleccionar o tamanho da colméia de modo a se ter pelo menos 5000 células na seção. Daí podemos imaginar a dificuldade de construção de colméias para seções relativamente pequenas.

O tamanho da célula não é importante e será determinado pela disponibilidade. Colméias de papel com células de até 6,35 mm (1/4") são adequadas para túneis pequenos, mas deve-se tomar cuidado com a deflexão da célula sob seu próprio peso ou da carga de ar, o que pode exigir colméias de metal ou suportes para tamanhos maiores que 1 m x 1 m. Estes suportes podem ser feitos como suportes de radiador de automóveis.

Um exemplo de boa colméia é uma das utilizadas no NPL, que consiste de tubos hexagonais montados juntos, com 100 mm de comprimento, largura de 10 mm e espessura de 0.12 mm. O coeficiente de perda de carga é 1.1, à velocidade de 1.7 m/s, 0.8 à 3.2 m/s e 0.6 à 5.7 m/s.

Neste projeto não foi utilizada nenhuma colméia devido aos custos envolvidos e, principalmente, por considerarmos que sua utilização não iria trazer benefícios muito significativos para o desempenho do túnel modelo.

7

TRECHO ESTABILIZADOR

O trecho estabilizador é o espaço do túnel entre a tela ou colméia retificadora e a contração, onde ocorre uma considerável atenuação dos vórtices gerados pela tela ou colméia. Esta atenuação ainda acontece no início da contração.

O trecho estabilizador nem sempre é requerido. É desejável a sua presença à montante de um retificador mas não pode ser muito longo ou a camada limite do escoamento entrando na contração será muito espessa. Pode ser totalmente dispensável à jusante de uma tela. Por outro lado pode-se usar a região após a tela como uma segunda seção de testes, com um grande diâmetro e, conseqüentemente, baixas velocidades. Neste caso, o trecho estabilizador deve ser mais longo e seguido de outra tela. Quando usando o trecho estabilizador desta maneira, é necessário estabelecer uma calibração apropriada para o túnel, com cuidados especiais, para evitar diversos efeitos de interferência possíveis.

Os trechos estabilizadores usados neste túnel são posicionados entre os dois conjuntos de telas e após o segundo conjunto, logo antes da contração.

8 CONTRAÇÃO

A contração é introduzida depois da colméia e telas, para dar uma distribuição de velocidades mais uniforme, especialmente uma camada limite mais fina e um baixo nível de turbulência, e também permite que a colméia e telas sejam colocadas numa região de baixa velocidade, onde as perdas são bem mais reduzidas.

Uma simples aplicação da equação de Bernoulli indica que variações percentuais na velocidade axial são reduzidas por um fator igual ao quadrado da razão de contração. Variações laterais de velocidade são reduzidas só por um fator igual à raiz quadrada da razão de contração, de modo que uma grande razão de contração não é substituto para colméia e telas. As coordenadas obtidas através do uso do programa de cálculo apresentado neste capítulo são mostradas na tabela 1.

Não se espera construir uma contração tão acuradamente quanto as coordenadas, que descrevem a sua geometria, possam ser levantadas analiticamente. Sabe-se que a suavidade de contornos é muito mais importante que a precisão dimensional para se obter um escoamento de boa qualidade. É importante mencionar que o final estreito da contração não deve ser descartado sob o pretexto de que ele possa ser

TABELA 1 - COORDENADAS DA CONTRACAO

DADOS DE ENTRADA:

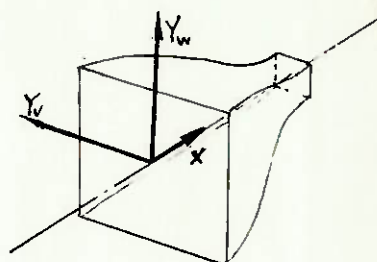
coeficiente de pressao a montante: 0.05

coeficiente de pressao a jusante: 0.05

dimensoes a montante: 0.45m x 0.45m

dimensoes a jusante: 0.12m x 0.12m

PONTO	X	Yw	Yv	desenv.
0	0.0000	0.2400	0.2400	0.0000
1	0.0276	0.2394	0.2394	0.0276
2	0.0552	0.2382	0.2382	0.0552
3	0.0827	0.2365	0.2365	0.0826
4	0.1101	0.2343	0.2343	0.1103
5	0.1375	0.2316	0.2316	0.1378
6	0.1646	0.2282	0.2282	0.1652
7	0.1916	0.2240	0.2240	0.1925
8	0.2183	0.2191	0.2191	0.2196
9	0.2447	0.2133	0.2133	0.2466
10	0.2704	0.2064	0.2064	0.2735
11	0.2955	0.1985	0.1985	0.2996
12	0.3196	0.1893	0.1893	0.3254
13	0.3425	0.1788	0.1788	0.3505
14	0.3637	0.1672	0.1672	0.3747
15	0.3830	0.1546	0.1546	0.3977
16	0.3992	0.1411	0.1411	0.4193
17	0.4140	0.1273	0.1273	0.4391
18	0.4253	0.1136	0.1136	0.4567
19	0.4334	0.1012	0.1012	0.4717
20	0.4383	0.0908	0.0908	0.4832
21	0.4436	0.0839	0.0839	0.4919
22	0.4502	0.0790	0.0790	0.5001
23	0.4573	0.0751	0.0751	0.5082
24	0.4646	0.0721	0.0721	0.5161
25	0.4722	0.0697	0.0697	0.5240
26	0.4797	0.0677	0.0677	0.5319
27	0.4874	0.0661	0.0661	0.5397
28	0.4951	0.0649	0.0649	0.5475
29	0.5028	0.0636	0.0636	0.5553
30	0.5106	0.0630	0.0630	0.5630
31	0.5183	0.0623	0.0623	0.5708
32	0.5261	0.0618	0.0618	0.5786
33	0.5338	0.0613	0.0613	0.5864
34	0.5416	0.0610	0.0610	0.5941
35	0.5493	0.0607	0.0607	0.6019
36	0.5571	0.0604	0.0604	0.6097
37	0.5649	0.0603	0.0603	0.6175
38	0.5727	0.0601	0.0601	0.6252
39	0.5804	0.0600	0.0600	0.6330
40	0.5882	0.0600	0.0600	0.6408



substituído por qualquer outra peça de lados paralelos. Se isto acontecer, ou seja, a contração for truncada em seu comprimento, parte equivalente do comprimento da seção de testes pode, do ponto de vista aerodinâmico, começar a se comportar automaticamente como parte da contração. Sendo assim, nota-se que as coordenadas levantadas para a geometria da contração indicam um trecho final com paredes paralelas, sendo isto parte do contorno recomendado e não um simples trecho de estabilização.

Convém notar que o escoamento não se torna uniforme até certa distância à jusante do final da contração, de modo que modelos não devem ser colocados muito próximos ao final da contração, nem devem ser feitas leituras de pressão estática nesta região, com o fim de ter uma medida direta da velocidade do escoamento na seção de testes. O mesmo se aplica à parte mais larga, do início da contração: as telas também não devem ser colocadas muito próximas à entrada da contração porque turbulências de baixa escala introduzidas pelas telas levam certo tempo para decair. Por outro lado, um trecho estabilizador muito extenso podem ocasionar a entrada de uma camada limite muito espessa na contração.

É apresentado a seguir um programa de computador, desenvolvido pelo Dr. John Willis, do BMT (British Maritime Technology), em uma versão adaptada para Turbo Pascal 5.0, para cálculo de contrações para escoamento bidimensionais ou com simetria axial. O cálculo bidimensional é baseado em um contorno escolhido no plano do hodógrafo, para o qual o escoamento é encontrado pelo método das imagens. A parede curva da contração é de comprimento finito, com seções

transversais paralelas à montante e à jusante. O método é aplicável para contrações com seções transversais bidimensionais, a velocidades nas quais os efeitos da compressibilidade são desprezíveis.

A contração resultante apresenta boa uniformidade do perfil de velocidades na saída e a separação das camada limite é evitada em contrações de comprimento moderado.

É assumido escoamento sem atrito, de forma que para um fluido real as formas devem ser modificadas com um pequeno deslocamento para fora, a fim de acomodar a espessura da camada limite.

Maiores detalhes e observações sobre o método de cálculo podem ser obtidos na referência [7].

Uma observação deve ser feita quanto a este programa em particular. Este programa foi feito para cálculo de contrações com seções transversais retangulares, portanto seus dados de entrada são direccionados para isto. Na necessidade de cálculo de contração com outro tipo de seção transversal o método pode se aplicar, mas não este programa especificamente.

Programa contracao;
uses crt,printer;

(WHITEHEAD, WU & WATERS CONTRACTION DESIGN (AERO.QUART. 11, Feb., 1951)

Calcula uma forma de contracção bidimensional de comprimento finito, partindo de um contorno específico no plano de hodografo. Os parametros de entrada são os coeficientes de pressão a , b e as dimensões a montante e a jusante da contracção.

Whitehead, Wu & Waters descobriram que uma contracção, axialmente simétrica, baseada nesta forma (i.e. tendo uma razão de contracção k quadrada) tem uma distribuição de pressões levemente melhor que a forma bidimensional.

Assim, é usual calcular uma contracção bidimensional de razão k , mas usa-la como uma contracção retangular cuja distribuição de área é a que corresponde a contracção axialmente simétrica de k quadrada. }

```
var u,v,w,s,z,c,b,d,e,f,g,sf,sum : real;
    r,s,t,j,k : byte;
    ff,ss: array[0..400] of real;
```

```

cc: array[1..4] of real;

procedure PROCEIG (var F : real);
var ab,ba,x,y : real;
aa,xx : array [0..2] of real;
i : byte;

procedure PROCHUN (var X : real);
var h,hx : real;
begin (prochun)
  x:= (e*exp(x)-g)/(2.0*exp(x)-2.0);
  h:=sqrt(abs(0.5*x+0.5));
  x:=sqrt(abs(0.5*x-0.5));
  hx:=abs(x-h);
  case r of
    0 : x:=(1-v)/(z*z*hx*hx+v*v-2*v+1);
    1 : X:=(1-v+Z*H)/(z*z*xx*x+z*z*hh*h-2*z*v*h+v*v+2*z*h-2*v+1);
    2 : x:=z*hx/(z*z*hh*hh+v*v-2*v+1);
    3 : x:=z*x/(z*z*xx*x+z*z*hh*h-2*v*z*h+v*v+2*z*h-2*v+1);
  end; (case)
end; (prochun)

begin (proceig)
  ab:=0.5*(b-a);
  ba:=0.5*(b+a);
  aa[0]:=0.467913735;
  aa[1]:=0.360761573;
  aa[2]:=0.171324492;
  xx[0]:=0.238619186;
  xx[1]:=0.661209386;
  xx[2]:=0.932469514;
  f:=0.0;
  for i:=0 to 2 do begin
    x:=ab*xx[i]+ba;
    prochun(x);
    y:=x;
    x:=-ab*xx[i]+ba;
    prochun(x);
    x:=x+y;
    f:=x*aa[i]+f;
  end; (for)
  f:=f*ab;
end; (proceig)

begin (programa principal)

ClrScr;
write(1st,chr(15));

writeln('  PROGRAMA PARA CALCULO DE CONTRACAO');
writeln('  Whitehead, Wu & Waters, 1951');
writeln;
writeln('  programação: Nilson M. Taira & Ciro R. Rodrigues; IPT, 1989');
writeln;
writeln('ENTRADA DE DADOS');
write(' Coeficiente de pressao a montante: '); readln(v);
write(' Coeficiente de pressao a jusante: '); readln(w);
writeln(' Dimensoes a montante (m): ');
write('          CC[1]: '); readln(cc[1]);
write('          CC[2]: '); readln(cc[2]);

```

```

writeln(' Dimensoes a jusante (m): ');
write('          CC[3]: '); readln(cc[3]);
write('          CC[4]: '); readln(cc[4]);

```

```

u := cc[1]*cc[2]/cc[3]/cc[4];

```

```

writeln(1st, '  PROGRAMA DE CALCULO DE CONTRACAO ');
writeln(1st, '      Whitehead, Wu & Waters, 1951 ');
writeln(1st);
writeln(1st, ' Coeficiente de pressao a montante: ', v:6:4);
writeln(1st, ' Coeficiente de pressao a jusante: ', w:6:4);
writeln(1st, ' Dimensoes a montante: ', cc[1]:5:2, ' m x ', cc[2]:5:2, ' m ');
writeln(1st, ' Dimensoes a jusante: ', cc[3]:5:2, ' m x ', cc[4]:5:2, ' m ');
writeln(1st, ' Razao de contracao : ', u:5:2);
writeln(1st);
writeln(1st, '          X          Yw          Yv          desenv. ');
writeln(1st, '-----');

```

```

u:=sqrt(u);
y:=u+v-1;
z:=y*w;
c:=2*ln((y*z*z+y*v*v)/(v*y*y+v*z*z));
d:=2*ln((z*z*z-z*v*v-z*v*y*y+z*z*y*y)/(z*z*z+v*v*z-z*v*y-y*z*z*y));
e:=(y*y*y+y*z*z*z)/(y*y*z*z);
g:=(z*z*z+z*v*v*v)/(v*v*z*z);
r:=0;

```

```

repeat

```

```

    ff[0]:=0.0;

```

```

    for s:=0 to 19 do begin

```

```

        t:=s+1;
        a:=0.05*s*c;
        b:=0.05*t*c;
        proceig(f);
        ff[t]:=u*(f/pi);
        ff[t]:=ff[t]+ff[t-1];
    end; {for}

```

```

    r:=r+1;

```

```

    for j:=0 to 19 do begin

```

```

        k:=j+1;
        a:=0.05*j*d+c;
        b:=0.05*k*d+c;
        t:=1+1;
        proceig(f);
        ff[t]:=u*(f/pi);
        ff[t]:=ff[t]+ff[t-1];
    end; {for}

```

```

    sum:=0.0; {somatorio do desenvolvimento}

```

```

    for t:=0 to 40 do begin

```

```

        if r=1 then gg[t]:=ff[t]
        else begin
            gg[t]:=cc[1]*gg[t-1]*(0.5/d);
            write(1st,t:3, ' ', gg[t]:7:5, ' ');
            g:=ff[t];
        end;
    end;

```

```

ff[t]:=0.5*(cc[1]-ff[t]*(cc[1]-cc[3])/(u-1));
write(1st,ff[t]:7:5,' ');

if t=1 then sum:=sum+sqrt(sqr(gg[t]-gg[t-1])+sqr(ff[t]-ff[t-1]));
( desenvolvimento da curva dada por X e Yw )

ff[t]:=gf;
ff[t]:=0.5*(cc[2]-ff[t]*(cc[2]-cc[4])/(u-1));

writeln(1st,ff[t]:7:5,sum:10:5);

end; {else}
end; {for}

r:=r+1;

until r < 2;

write(1st,chr(27),chr(64));

end.

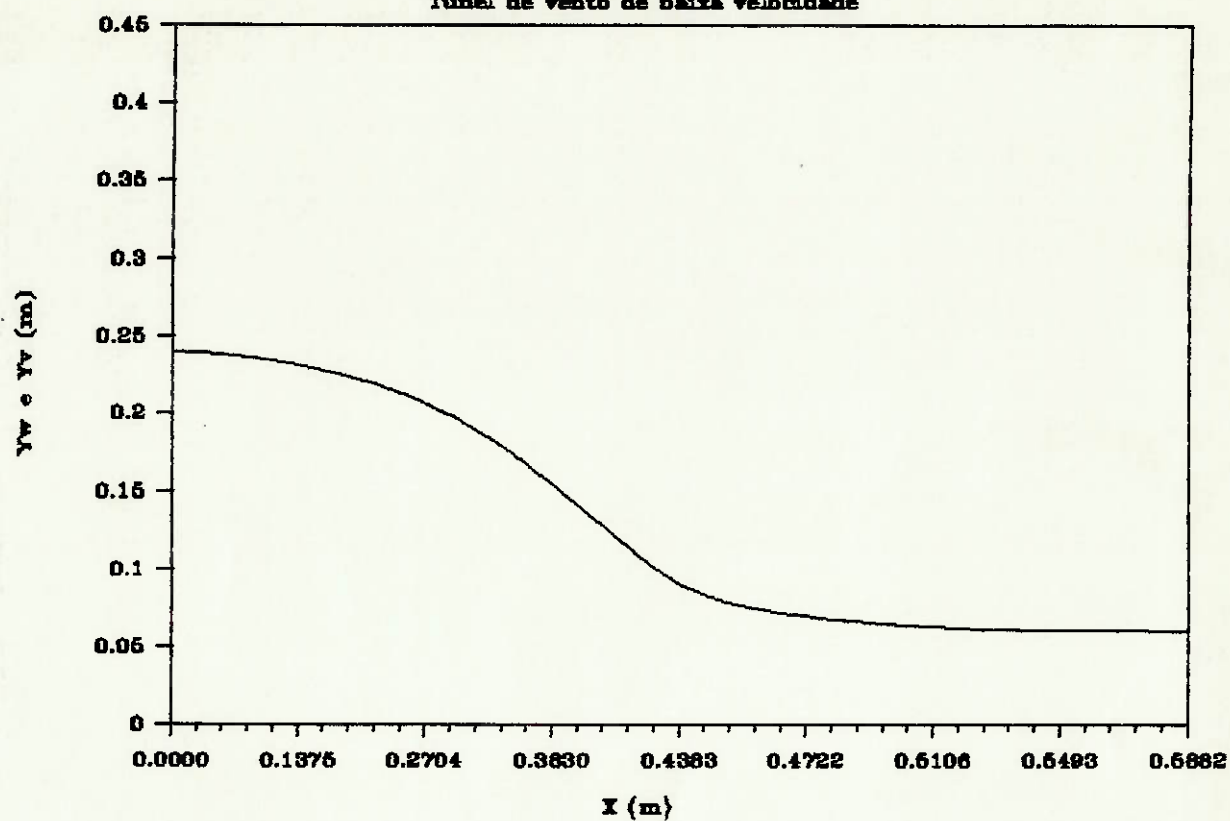
```

O gráfico apresentado na figura 10 mostra o contorno da contração, usando os pontos da tabela 1. As escalas dos eixos com as medidas longitudinais e transversais do gráfico não são iguais e, portanto, o desenho não representa perfeitamente a geometria resultante, mas fornece uma visualização básica desta.

FIGURA 10

CONTORNO GEOMETRICO DA CONTRACAO

Túnel de vento de baixa velocidade



SEÇÃO DE TESTES

A parte operacional do túnel de vento é a região a jusante da contração, suficientemente distante para evitar interferência entre o modelo em teste e o escoamento na contração, mas não distante o suficiente para ser afetada pelos efeitos indesejáveis do desenvolvimento da camada limite

A seção transversal mais popular para um túnel de vento é um retângulo de razão 2 para 1, com cantoneiras em toda a extensão dos vértices. É usual que a maior dimensão seja a horizontal, para acomodar modelos de aviões.

O tamanho das cantoneiras é variável: geralmente são grandes o suficiente para impedir o crescimento excessivo da camada limite nos cantos, mas algumas vezes a seção transversal aproxima-se de uma elipse.

Para túnel de vento destinado a aferição, uma seção de testes de 450 x 450 mm é a menor possível para esta finalidade, mas as considerações de projeto são válidas para túneis de vento com outros tamanhos para a seção de testes.

O uso de seção exata quadrada ou retangular sem cantoneiras não é indicado, pois o crescimento da camada limite nos cantos pode ser excessivo, não chegando, porém, a

ser algo muito sério em túneis de baixa potência, tal como o descrito neste trabalho.

O formato octogonal pode ser indicado por vários motivos:

1. ajuda a diminuir consideravelmente o crescimento da camada limite nos cantos;
2. é mais econômico em potência que a seção quadrada, para uma dada distância entre paredes;
3. é mais conveniente para o propósito de fixação de objetos na seção e para utilizar janelas de observação, que os túneis circulares.
4. o acoplamento da seção de testes ao duto circular de um ventilador axial é facilitado.

Para limitar o tamanho geral do túnel e, mais importante, para minimizar os efeitos perturbadores de correntes de convecção e outras correntes espúrias em baixas velocidades, é necessário escolher uma seção de testes relativamente curta.

Deve-se evitar seções de testes muito longas, por que isso leva fatalmente à separação da camada limite. Uma indicação geral, para fins aeronáuticos, é de que o comprimento da seção de testes deve ser de aproximadamente três diâmetros.

Quando não se deseja ter queda de pressão no sentido do eixo, a seção de testes deve ter uma ligeira divergência (cerca de 1°) para compensar o crescimento da camada limite. Esta divergência é mais facilmente incorporada nas paredes a 45° com a horizontal (nas cantoneiras), por motivos de montagem e construção.

Uma seção de testes razoável para túneis pequenos pode ser feita com madeira compensada de 3/4" com uma estrutura forte. Sem dúvida pode haver pequenas variações periódicas na aferição do túnel, relacionadas com variações na umidade que podem causar mudanças nas dimensões. Outros materiais podem ser menos sujeitos a estas variações, mas a madeira ainda é o mais conveniente.

Deve-se prever ainda a colocação de duas portas, uma de cada lado da seção de testes, feitas de acrílico transparente ou vidro, que permitem uma visibilidade adequada. Também devem ser previstos meios de montagem para os instrumentos, através de fixação adequada no assoalho da seção.

A seção de testes para este túnel não foi construída, sendo prevista a sua montagem no futuro. Um desenho de uma das paredes laterais da seção consta do anexo. Ela terá comprimento igual à largura do lado, ou seja, cerca de 120 mm, com um ângulo de divergência de 1°, em relação ao eixo central.

SALA DO TÚNEL

Como a sala do túnel forma o circuito de retorno de um túnel de circuito aberto, ela deve ser grande o suficiente para ter uma velocidade do ar muito baixa quando comparada com a da seção de testes.

Grandes túneis de circuito aberto requerem uma grande quantidade de espaço livre na sala, de modo que o arranjo de túnel em circuito fechado começa a se tornar mais econômico, em função do custo do espaço ocioso, sendo que o ponto de "break-even" depende da avaliação dos custos do espaço vago na sala e dos custos de construção.

As paredes devem estar a pelo menos quatro diâmetros da seção de testes distante do túnel em todas as direções: o túnel deve ser preferivelmente montado a meio caminho das paredes do teto e do chão. Se o túnel for montado numa sala que é muito grande, correntes parasitas podem (através da conservação da quantidade de movimento) provocar vórtices consideráveis na entrada do túnel. É bastante aconselhável o uso simultâneo de dois túneis de circuito aberto na mesma sala, sem que se tomem precauções adequadas.

Há algumas salas que são cortadas ao meio por uma coiméla para retificar o escoamento, mas isso parece ser

46

muito dispendioso. O uso de uma tela retificadora pode ser interessante.

De preferência a sala do túnel deve ser de um tamanho tal que o eixo do túnel esteja de 1,5 m a 1,80 m distante do teto, do chão e das paredes laterais. Um túnel de circuito aberto, com uma seção de testes maior que $0,3 \text{ m}^2$ requer, no mínimo, espaços livres de comprimento igual a 20 vezes o diâmetro da seção de testes. Deve-se tomar cuidado com túneis com velocidades muito baixas sendo influenciados por salas muito grandes com correntes estranhas, aquecimento em locais localizados, etc.

Devem ser instalados medidores de temperatura em diversos locais, para o controle térmico da sala.

No nosso caso, a sala do túnel é o Laboratório de Medidas de Vazão do IPT. Durante o levantamento do perfil de velocidades não foi notado efeito sobre o escoamento devido à movimentação de pessoas na sala.

1.1

AFERIÇÃO DO TUNEL DE VENTO

Se uma colméia retificadora rígida for usada sem telas, a velocidade do vento num túnel aberto será convenientemente relacionada com a diferença de pressão entre a atmosfera e a do final da contração, próxima à seção de testes. Este arranjo dá para qualquer velocidade do vento uma grande diferença de pressão. Por outro lado se usar telas (que dão grande diferença de pressão mesmo a baixas velocidades), é necessário assegurar que as telas estejam sempre limpas e numa posição e forma precisamente repetitivas dentro do túnel.

A tubulação que mede a pressão deve ser sempre bem protegida contra radiação e convecção, especialmente nas baixas pressões.

Quando houver dificuldade em limpar a colméia ou assegurar a limpeza das telas, então a tomada de pressão aberta para a atmosfera deve ser tomada no túnel, à jusante da tela ou colméia.

O ponto de tomada de pressão no fim da contração deve ser situado à jusante do pico de sucção da curva de pressão na superfície e onde a declividade da curva é maior, que é uma condição bastante estável. A região do pico é sujeita a alguma flutuação.

Recomenda-se tomar a pressão em 4 paredes alternadas, provavelmente as paredes a 45° . Os furos devem ser de $3/16"$. Deve-se na realidade preparar um anel piezométrico.

OUTROS MÉTODOS

1. Uso de anemômetros de pás calibrados, desde que se tomem cuidados com a correção de densidade e do efeito de "bloqueamento".
2. Em velocidades muito baixas o uso de anemômetros de fio quente é indicado, mas em velocidade de 0,1 a 0,3 ft/s deve-se utilizar partículas de metafuel, iluminadas e cronometradas.
3. Frequentemente se usa um tacômetro instalado no ventilador.
4. Tubo de Pitot - quando se usa um tubo de Pitot, deve-se tomar cuidado com o efeito de bloqueamento: um tubo de $5/16"$ de diâmetro inserido no centro do túnel pode aumentar a velocidade em sua vizinhança em mais ou menos 0,3%.

O meio mais satisfatório de determinar o efeito de bloqueamento é calibrar o anemômetro em um túnel muito maior e comparar os resultados com o do túnel menor.

12

CONSTRUÇÃO DO TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento é formado pelos seguintes componentes:

1. ventilador centrífugo e motor.
2. duas câmaras de estabilização com telas metálicas perfuradas.
3. contração.
4. seção de testes.

As câmaras de estabilização e o ventilador eram equipamentos já existentes e montados no Laboratório. As câmaras são feitas de chapas de aço soldadas e são acopláveis entre si.

A configuração básica dos componentes pode ser vista em desenho de conjunto no anexo.

Foi necessário o projeto e construção da contração.

A contração poderia ter sido feita em madeira compensada. Para construí-la usando este material adota-se o seguinte procedimento: faz-se um molde em madeira do contorno da contração; cortam-se várias placas de madeira compensada de pequena espessura, com o desenvolvimento da superfície da contração; cada uma das placas é curvada sobre o molde, passa-se cola e coloca-se outra placa, sendo o con-

junto prensado até a cola secar, fazendo com que as placas tomem a forma desejada. Montam-se assim as quatro paredes da contração, que são então encaixadas e montadas na sua forma final. É um processo bastante trabalhoso e, devido ao tamanho reduzido da contração, foi preterido, dando lugar ao uso de PVC. Por outro lado, o uso de placas de PVC soldadas não parece ser uma boa idéia para túneis de maior porte, pois o processo de soldagem seria muito dificultado.

O programa de cálculo fornece as coordenadas longitudinais do desenvolvimento, que foram passadas a um sistema CAD juntamente com as coordenadas transversais. Os pontos foram interpolados e foi plotado o contorno, fornecendo um gabarito para o corte das chapas de PVC que formariam as paredes.

A folha de papel com o desenho da superfície foi colada à placa de PVC, posteriormente cortada e usada como modelo para marcar as outras três paredes restantes.

As placas de PVC, com 3 mm de espessura, foram levadas à uma estufa, à temperatura de 80°C. Nesta temperatura o PVC amolece o suficiente para ser curvado com bastante facilidade, e cada placa foi curvada sobre uma peça em madeira maciça, com o formato do contorno desejado.

Foram montados dois quadros de madeira, com as dimensões das seções de entrada e de saída da contração onde foram fixadas as peças de PVC. As peças de PVC ainda estavam separadas umas das outras mas, presas aos quadros, já apresentando um formato em conjunto semelhante ao desejado ao final.

Foram passados então vários cordões de solda unindo cada parede às suas adjacentes. Quando os quadros fo-

ram retirados, verificou-se que o conjunto apresentava boa rigidez, mas aparentava fragilidade a esforços transversais ou de torção. A região da solda parece ser particularmente crítica. Para acabamento, outro cordão de solda preencheu as junções internas das paredes, para garantir rigidez e vedação da peça. A soldagem do PVC é feita utilizando-se um maçarico de ar quente e varetas de PVC para enchimento do cordão de solda. Ela deve ser executada com cuidado: se a temperatura do ar no maçarico é baixa, a vareta e a placa não fundem e a solda fica muito frágil; se for muito alta, corre-se o risco de queimar o PVC, ou deformar a placa.

Os cantos internos da contração, isto é, as junções das paredes, foram retocados usando-se um esmeril pneumático portátil, eliminando-se saliências e rebarbas. É muito importante a suavidade dos contornos dentro da contração, por isso foi tomado especial cuidado com o acabamento interno.

Foi soldado um flange, também em PVC, na parte externa da contração, para fixá-la à câmara de estabilização. Foi usado para este flange um pedaço de PVC da mesma espessura da contração, 3 mm, mas parece ser recomendável usar uma placa mais espessa, para garantir melhor vedação no acoplamento à câmara. Deve-se tomar cuidado para garantir que o flange esteja com sua face no mesmo plano da seção transversal da contração.

A seção de testes deverá ser feita da mesma maneira, providenciando-se então um flange para a extremidade menor da contração, para permitir o acoplamento das duas peças.

13

PERFIL DE VELOCIDADES NA SAÍDA
DA CONTRAÇÃO

Logo após a construção da contração, ela foi acoplada aos outros componentes do túnel de vento. Passou-se então a levantar o perfil de velocidades na saída, utilizando um tubo de Pitot e um micromanômetro. Durante a medida do diferencial de pressão em cada ponto a leitura no micromanômetro era bastante estável, o que indica um escoamento estável.

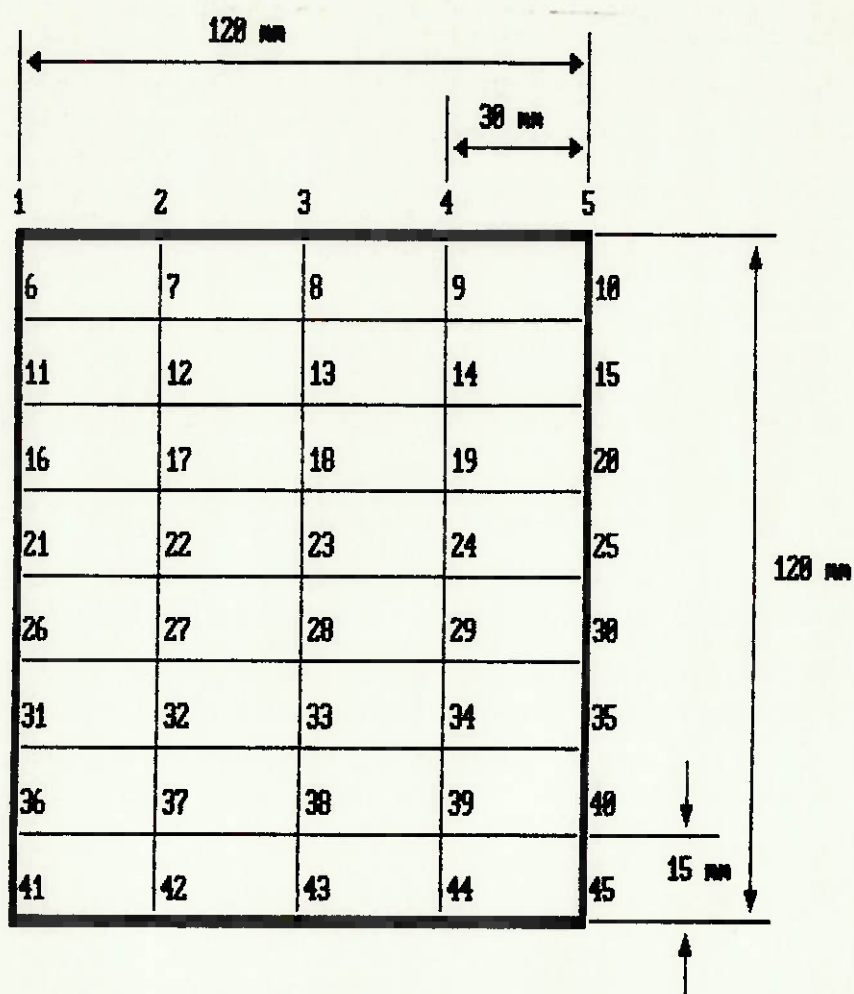
O objetivo não era propriamente verificar qual a velocidade de saída, mas sim a sua uniformidade. São apresentados a seguir os resultados obtidos em diversos pontos da seção de saída da contração, através da tabela 2, e dos gráficos anexos. A figura 11 apresenta a posição dos pontos escolhidos.

CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o escoamento obtido é de boa qualidade. Comparando-se os cinco gráficos, relativos aos cinco planos verticais, verifica-se facilmente a uniformidade nos perfis de velocidade, o que também pode ser verificado na figura 12. Somente em pontos muito próximos dos cantos a velocidade se altera de modo um pouco mais signi-

ficativo. Pode-se considerar então que o contorno da contração levou a resultados bastante satisfatórios e que o túnel cumpre o seu objetivo de produção de escoamento uniforme e de baixa turbulência.

FIGURA 11



posicao dos pontos de leitura de velocidades
na saida da contraccao

FIGURA 12

perfil tridimensional de velocidades na saída da contração

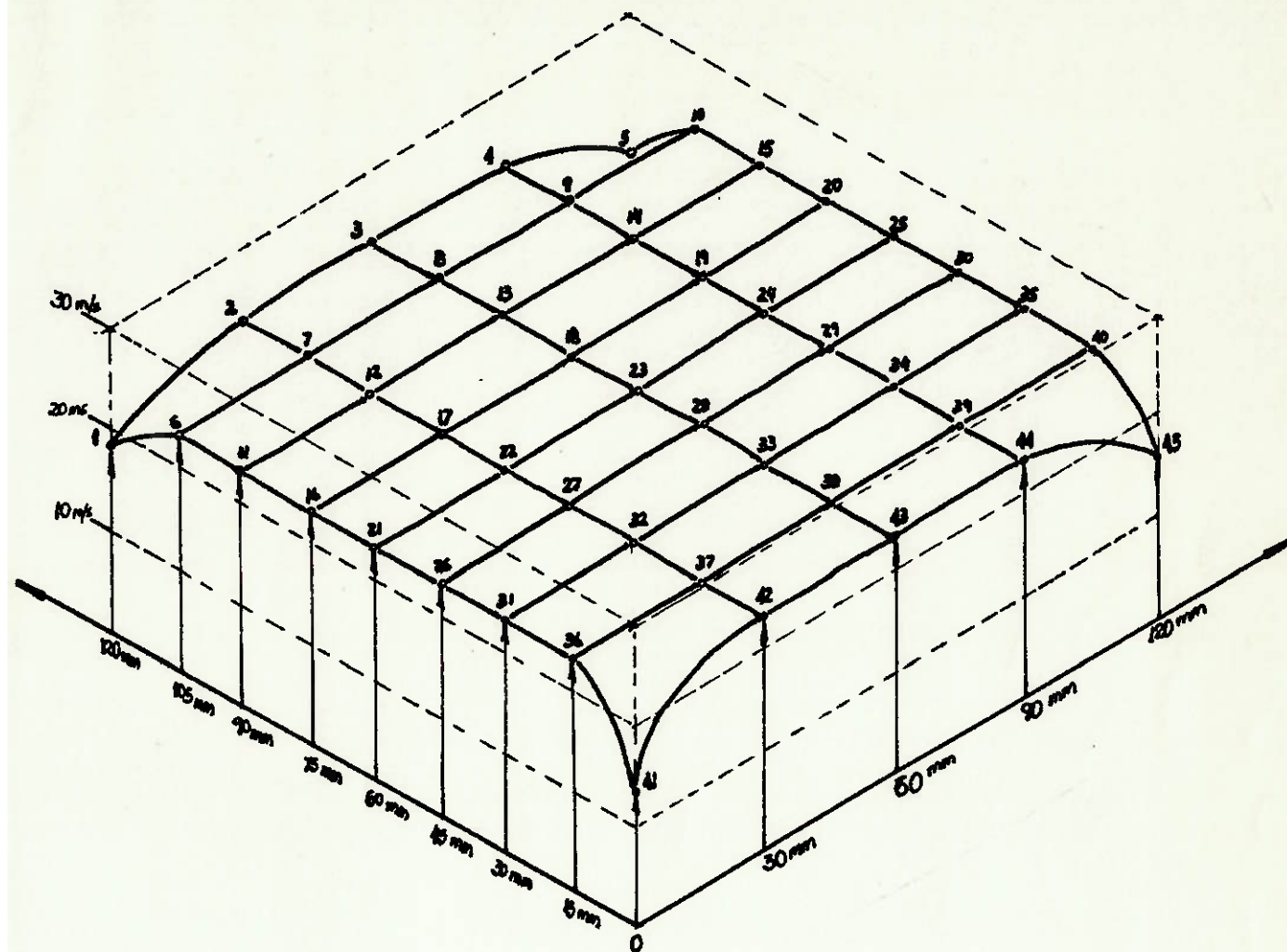


TABELA 2 - PLANILHA DE LEVANTAMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADES
NA SAIDA DA CONTRACAO

DATA: 08/12/89

Patm = 704 mmHg

	Delta P (mmca)	P est (mmca)	TBS (C)	TBU (C)	Pe (Pa)	Pp (Pa)	mas. espec. (kg/m ³)	V (m/s)
1	19.8	0.0	22.25	18.25	2112.16	1861.87	1.099	18.8
2	30.0	0.6	22.25	18.25	2112.16	1861.87	1.099	23.1
3	30.2	0.2	22.25	18.25	2112.16	1861.87	1.099	23.2
4	30.2	0.2	22.25	18.25	2112.16	1861.87	1.099	23.2
5	16.0	-0.4	22.25	18.25	2112.16	1861.87	1.099	16.9
6	30.2	0.4	22.50	18.25	2112.16	1846.23	1.098	23.2
7	30.6	0.6	22.50	18.25	2112.16	1846.23	1.098	23.4
8	30.4	0.0	22.50	18.25	2112.16	1846.23	1.098	23.3
9	30.6	0.6	22.50	18.25	2112.16	1846.23	1.098	23.4
10	30.0	0.0	22.50	18.25	2112.16	1846.23	1.098	23.1
11	30.0	0.0	22.75	18.25	2112.16	1830.58	1.097	23.1
12	30.0	0.2	22.75	18.25	2112.16	1830.58	1.097	23.1
13	30.2	0.2	22.75	18.25	2112.16	1830.58	1.097	23.2
14	30.4	0.2	22.75	18.25	2112.16	1830.58	1.097	23.3
15	30.2	0.2	22.75	18.25	2112.16	1830.58	1.097	23.2
16	30.4	0.2	22.75	18.25	2112.16	1830.58	1.097	23.3
17	30.0	0.3	22.75	18.25	2112.16	1830.58	1.097	23.1
18	30.0	0.4	22.75	18.25	2112.16	1830.58	1.097	23.1
19	30.2	0.2	22.75	18.25	2112.16	1830.58	1.097	23.2
20	30.2	0.0	22.75	18.25	2112.16	1830.58	1.097	23.2
21	30.0	0.2	22.75	18.25	2112.16	1830.58	1.097	23.1
22	30.0	0.3	23.00	18.25	2112.16	1814.94	1.096	23.1
23	30.2	0.4	23.00	18.25	2112.16	1814.94	1.096	23.2
24	30.2	0.2	23.00	18.25	2112.16	1814.94	1.096	23.2
25	30.3	0.2	23.00	18.25	2112.16	1814.94	1.096	23.3
26	30.2	0.1	23.00	18.25	2112.16	1814.94	1.096	23.2
27	30.2	0.3	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.2
28	30.0	0.2	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.1
29	30.0	0.3	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.1
30	30.2	0.2	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.2
31	30.2	0.2	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.2
32	30.2	0.0	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.2
33	29.8	0.4	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.1
34	30.0	0.2	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.1
35	30.2	0.2	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.2
36	30.4	0.0	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.3
37	30.4	0.6	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.3
38	30.0	0.3	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.1
39	30.0	0.4	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.1
40	30.2	0.2	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.2
41	10.0	-0.4	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	13.4
42	30.0	0.2	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.1
43	30.0	0.2	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.1
44	30.2	0.2	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	23.2
45	13.8	-0.4	23.00	18.00	2078.09	1765.23	1.096	15.7

PERFIL DE VELOCIDADES

SAIDA DA CONTRACAO

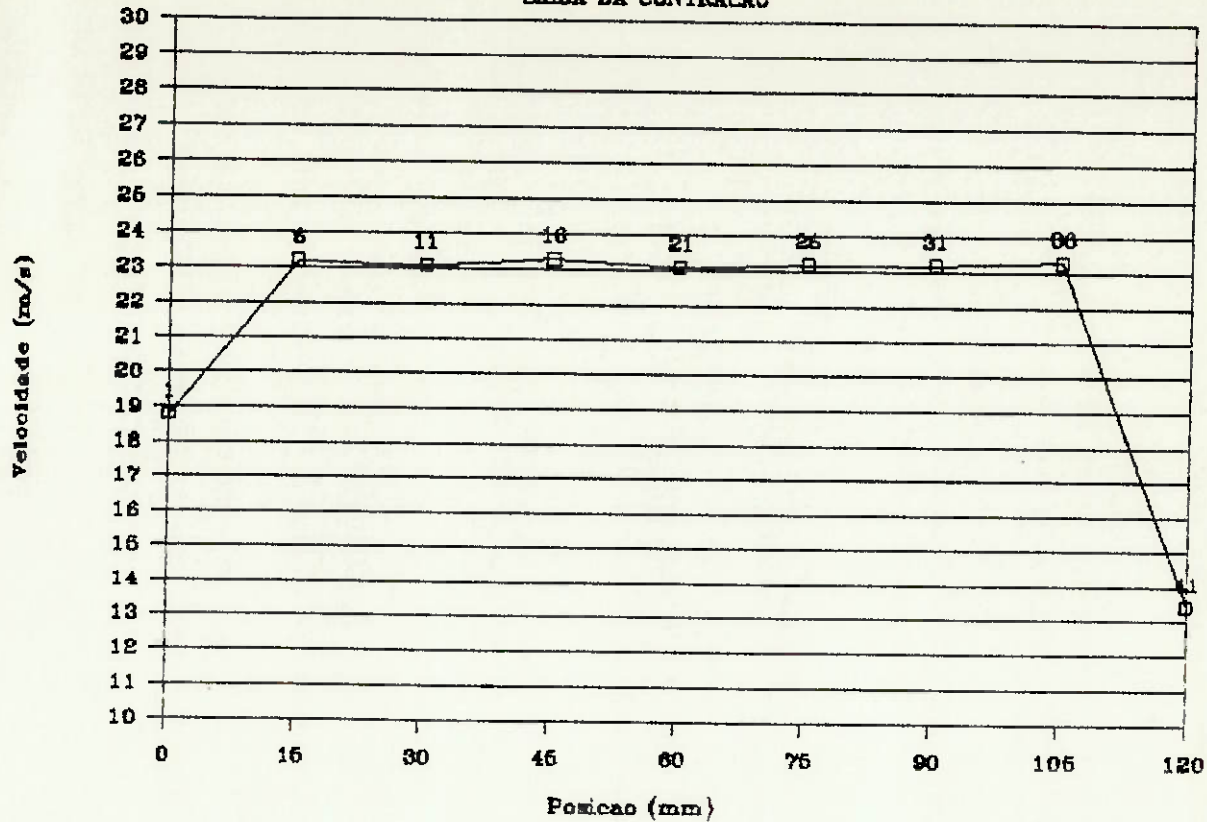
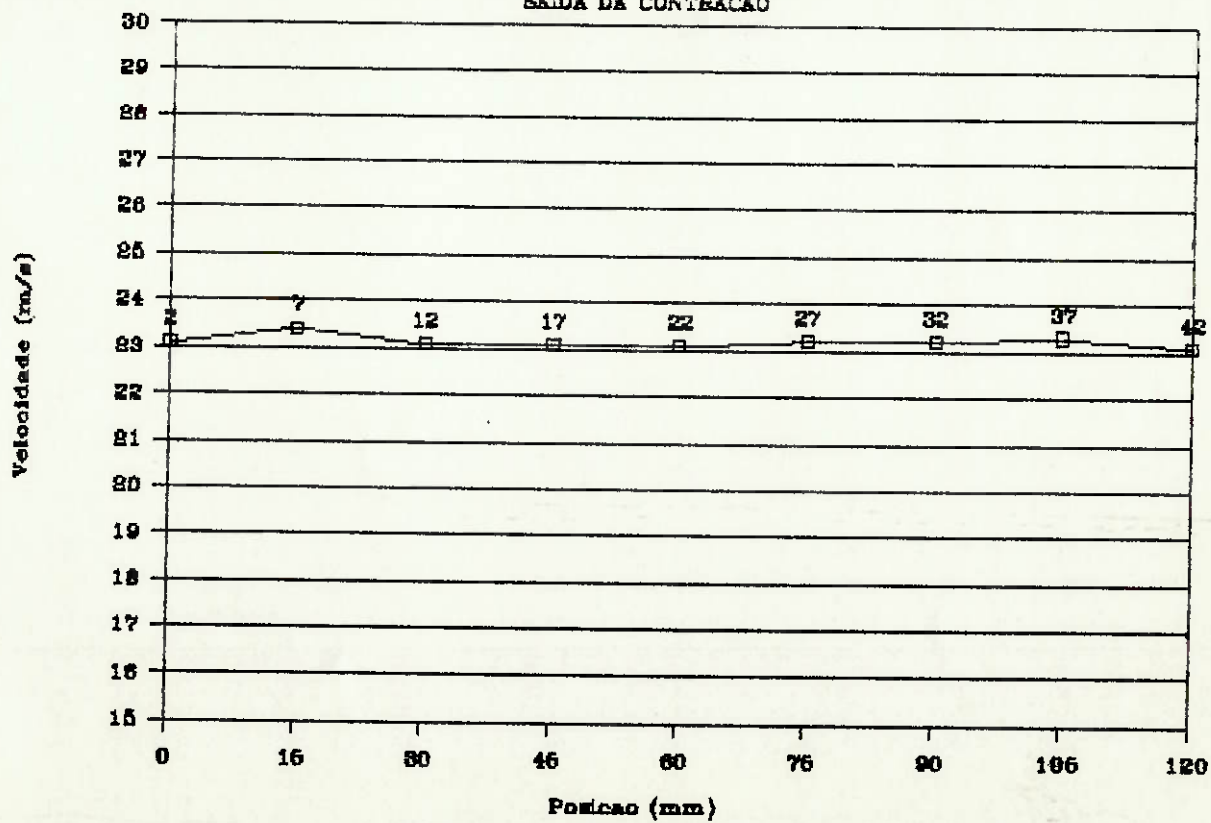


FIGURA 14

PERFIL DE VELOCIDADES

SAIDA DA CONTRACAO



PERFIL DE VELOCIDADES

SAIDA DA CONTRACAO

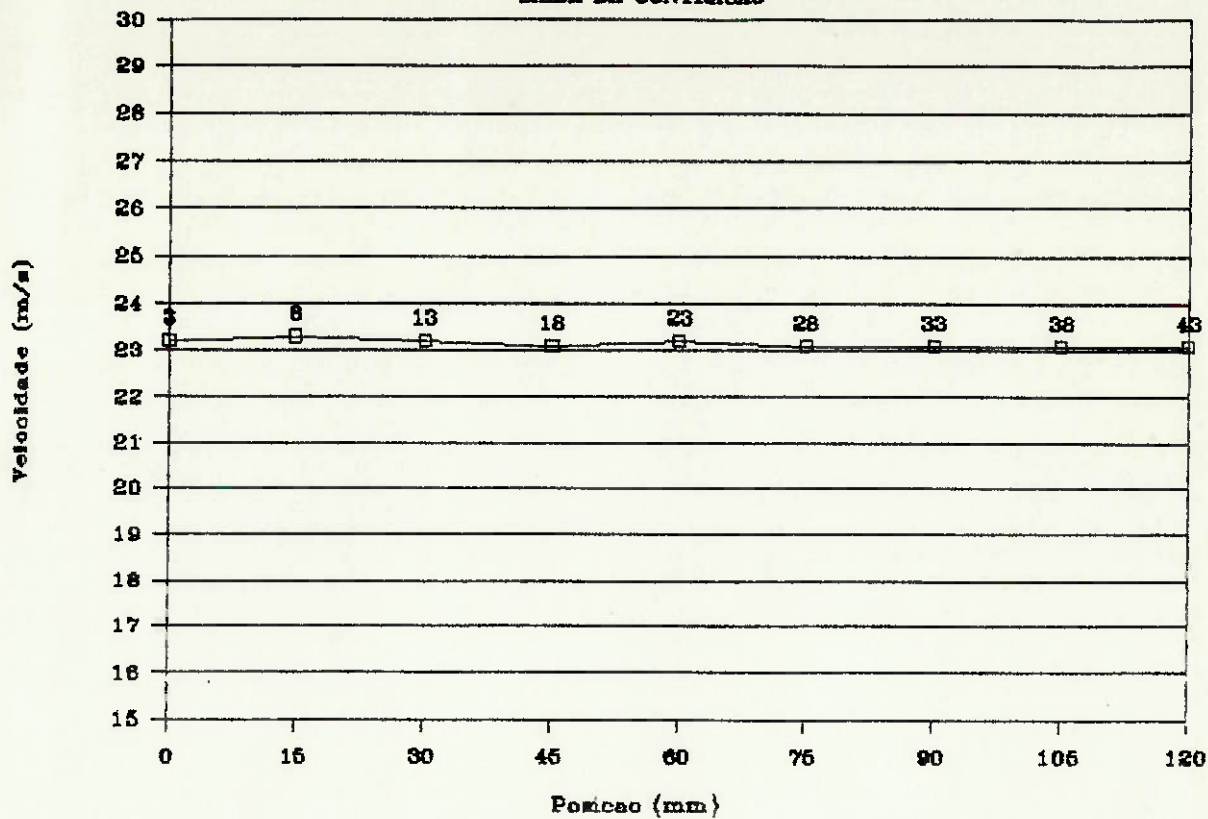


FIGURA 16

PERFIL DE VELOCIDADES

SAIDA DA CONTRACAO

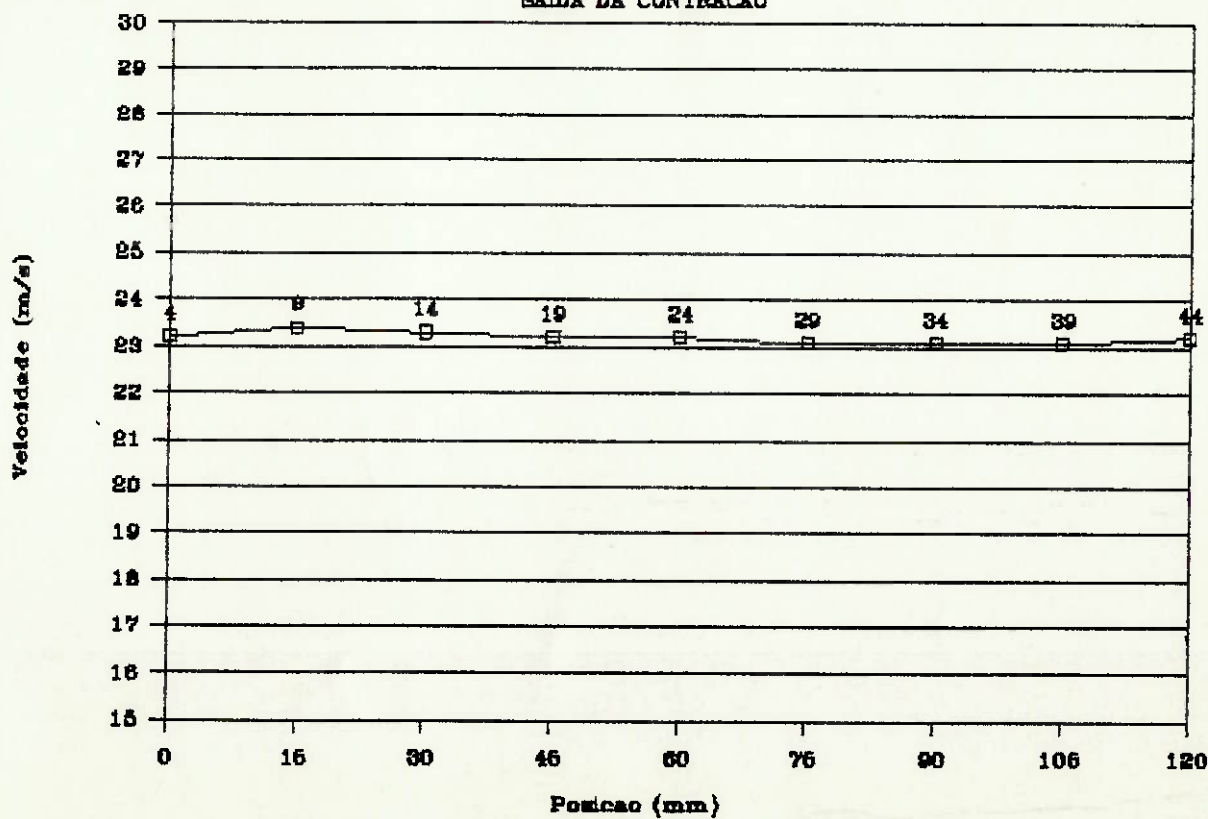
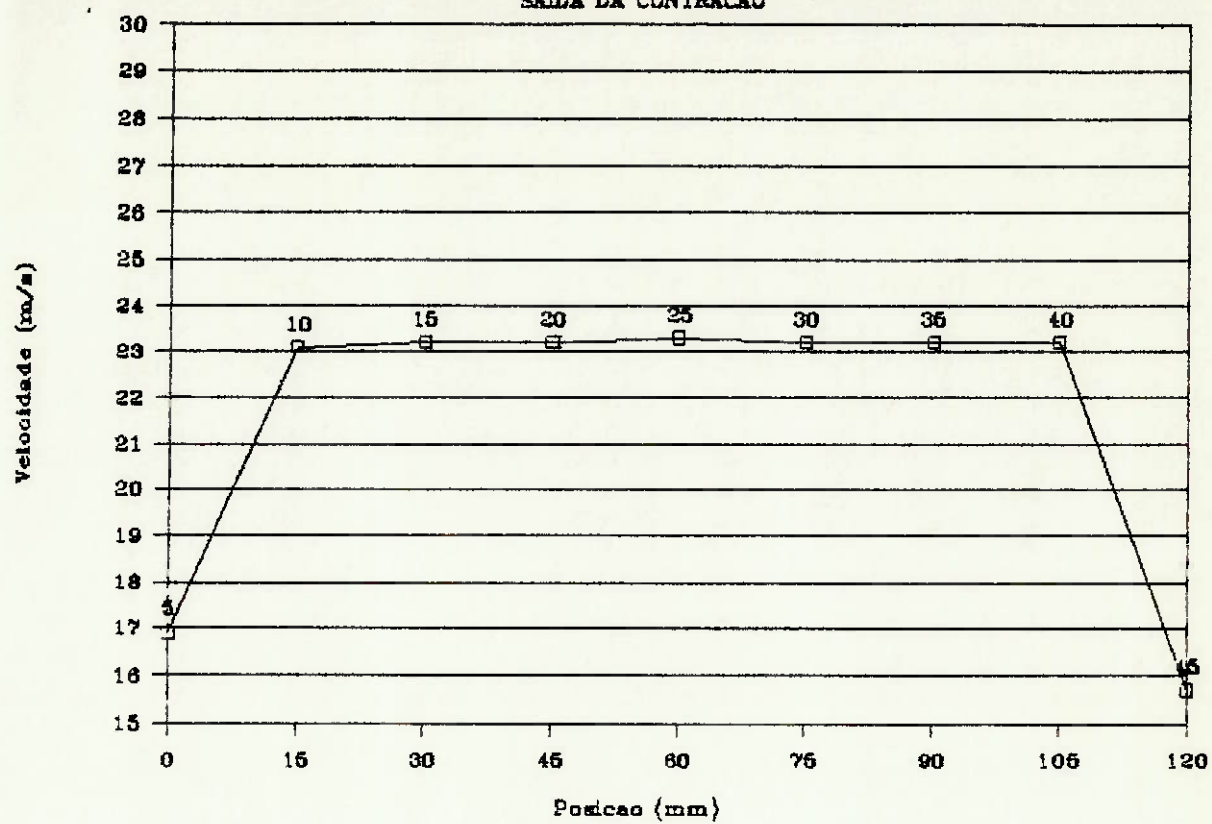


FIGURA 17

PERFIL DE VELOCIDADES

SAIDA DA CONTRACAO



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bradshaw, B.
"A Low-turbulence Wind Tunnel Driven by a Centrifugal Blower"
NPL Aero Report 1171, 1965.

- [2] Bradshaw, B.
"Simple Wind Tunnel Design"
NPL Aero Report 1258, 1968.

- [3] Bradshaw, B. & Pankhurst, R.C.
"The Design of Low-speed Wind Tunnel"
NPL Aero Report 1039, 1962.

- [4] Pereira, Marcos T.
"Projeto de Túnel de Vento Para Aferição de Anemômetros de Pás, de Fio e de Filme Quente"
São Paulo, IPT.

- [5] Pope, Alan
"Wind Tunnel Testing"
2a. ed., New York, Wiley Co., 1954.

14

[6] Salter, C.

"Low-speed Wind Tunnels for Special Purposes (revised)"
NPL Aero Report 1218, 1966.

[7] Whitehead, L.G., Wu, L.Y. & Waters, M.H.L.

"Contracting Ducts of Finite Length"
Aero Quart. 11, 1951.

ANEXO

DESENHOS

Neste anexo apresentamos desenhos relativos ao túnel de vento modelo, construído segundo o projeto descrito:

DESENHO 1 - desenvolvimento da superfície lateral da contração.

DESENHO 2 - desenho de conjunto do túnel.

DESENHO 3 - parede lateral da seção de testes.