

1782

NILSON MASSAMI TAIRA

**ESTUDO DE CONTRAÇÕES PARA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO
UNIFORME EM TÚNEIS DE VENTO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

FD-1782

**São Paulo
1994**

OK

NILSON MASSAMI TAIRA

**ESTUDO DE CONTRAÇÕES PARA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO
UNIFORME EM TÚNEIS DE VENTO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador:
Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta**

**São Paulo
1994**

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010029

Aos meus pais, exemplos de perseverança
e incansável dedicação, e a Tokie, por
ter suportado com paciência a minha
ausência por vários momentos.

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta pela atenção e orientação segura.

Aos colegas do Laboratório de Vazão do IPT pela compreensão e cooperação, e em especial aos colegas Marcos Tadeu Pereira, pelo valioso auxílio na revisão do texto, François H. F. Loncke, pela competência e dedicação na condução dos primeiros estudos numéricos e experimentais, Marcos Costa Miranda, pelo apoio nos ensaios experimentais.

Ao colega do Laboratório de Plasma Térmico do IPT, Luiz Carlos Vicente, por ter cedido gentilmente o software para as simulações numéricas.

A todos que direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

S U M Á R I O

Lista de tabelas

Lista de figuras

Lista de símbolos

Resumo

"Abstract"

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
3	TÚNEIS DE VENTO	4
3.1	Introdução histórica	4
3.2	Classificação dos túneis de vento	9
3.3	Exemplos de túneis de vento subsônicos.	10
4	GERAÇÃO DE ESCOAMENTO UNIFORME EM TÚNEIS DE VENTO	15
4.1	Flutuação de velocidade	15
4.2	Uniformidade do perfil de velocidade	17

4.3	Procedimentos para obtenção de escoamento uniforme em túneis de vento	17
5	ESTUDO DE CONTRAÇÕES	20
5.1	As idealizações de Prandtl e Batchelor	20
5.2	O escoamento no interior das contrações	23
5.3	Separação no escoamento devido à curvatura da parede	27
5.4	O critério de separação de Stratford	29
6	TÉCNICAS DE GERAÇÃO DE GEOMETRIAS DE CONTRAÇÕES	33
6.1	Classificação das contrações	34
6.2	Técnica visual	36
6.3	Técnica da análise de semelhança	37
6.3.1	Semelhança geométrica	37
6.3.2	Analogia elétrica	38
6.3.3	Estudo de Rouse e Hassan	39
6.4	Técnica da aceleração uniforme	40
6.4.1	Estudo de Cohen e Ritchie	40
6.4.2	Estudo de Lau	41
6.4.3	Estudo de Bossel	41
6.4.4	Estudo de Chmielewski	42
6.4.5	Estudo de Ramjee e Hussain	44
6.5	Técnica do hodógrafo	46
6.5.1	Estudo de Whitehead	46
6.5.2	Estudo de Jordinson	48
6.6	Técnica de polinômios	49
6.6.1	Estudo de Morel	49

6.6.2	Estudo de Hussain e Ramjee	52
6.6.3	Estudo de Mikhail e Rainbird	53
6.6.4	Estudo de Batill e Hoffman	54
6.6.5	Estudo de Su	55
7	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE GEOMETRIAS DE	
	CONTRAÇÕES	58
7.1	Geometrias de contrações	60
7.2	Simulação numérica do escoamento potencial .	65
7.2.1	O programa ALGOR	66
7.2.2	Malha de solução	67
7.2.3	Condições de contorno	70
7.3	Simulação numérica do comportamento da cama-	
	da limite	71
7.3.1	O programa STAN7A	71
7.3.2	Malha de solução e condições de contorno .	74
7.4	Metodologia experimental	75
7.4.1	Medição do perfil de velocidade	75
7.4.2	Medição da intensidade de turbulência na saí-	
	da da contração	76
7.4.3	Medição da intensidade de turbulência no eixo	
	longitudinal	78
7.4.4	Aparato experimental	79
7.4.5	Descrição da instrumentação	81
8	RESULTADOS	83
8.1	Resultados da simulação numérica do escoa-	
	mento potencial	83

8.1.1	Linhas de iso-velocidades	84
8.1.2	Distribuição de velocidade na parede	93
8.1.3	Perfis de velocidades na saída das contrações resultantes da simulação com o programa ALGOR	98
8.2	Resultados da simulação numérica do compor- tamento da camada limite	100
8.3	Resultados experimentais	109
8.3.1	Perfis de velocidade na saída da contração	110
8.3.2	Intensidade de turbulência na saída da contração	117
8.3.3	Intensidade de turbulência no eixo lon- gitudinal da contração.	119
8.3.4	Flutuação de velocidade induzida próxima às paredes da contração	121
8.4	Verificação dimensional da contração	124
9	CONCLUSÕES	125
	ANEXO A	130
	ANEXO B	131
	ANEXO C	132
	ANEXO D	136
	ANEXO E	138
	ANEXO F	144
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144

Apêndice A

LISTA DE TABELAS

- Tabela 3.1** Túneis de vento subsônicos
- Tabela 6.1** Classificação das geometrias de contrações
- Tabela 7.1** Metodologia de geração das contrações
- Tabela 7.2** Parâmetros gerados pelo programa STAN7A
- Tabela 8.1** Resumo das simulações do comportamento da camada limite nas contrações

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1 Haste giratória de Lilienthal
- Figura 3.2 Túnel de vento de Stanton (1903)
- Figura 3.3 Túnel de vento de Göttingen (1916-1917)
- Figura 3.4 Túnel de vento de circuito fechado do NPL com dimensões da seção de testes de 0,9x0,9m
- Figura 3.5 Túnel de vento de circuito aberto do NPL com dimensões da seção de testes de 0,25x0,38 m
- Figura 5.1 a) não uniformidade da velocidade média na contração
b) estiramento de filamentos de vórtices (*vortex stretching*) no interior da contração
- Figura 5.2 Distribuição de velocidade na parede e no eixo de uma contração finita
- Figura 5.3 a) tipos de perfis de velocidade provocados por de pressão;
b) sequência de formação de escoamento reverso devido à existência de gradientes adversos de pressão.
- Figura 5.4 Seqüência do desenvolvimento da camada limite na presença de um gradiente de pressão para $x=x_0$ e $x>x_0$
- Figura 5.5 a) A separação do escoamento com escoamento reverso
b) O balanço de força
- Figura 6.1 Representação esquemática da analogia entre o escoamento irrotacional e o fluxo de corrente para uma contração bidimensional

- Figura 6.2 Comparação das contrações de Whitehead, Lighthill e Cheers.
- Figura 6.3 Contorno da contração construída por dois arcos cúbicos
- Figura 6.4 As quatro geometrias de contração utilizadas por Hussain e Ramjee: a) polinômio de grau 3, b) forma de Batchelor-Shaw, c) ASME raio longo, d) ASME raio curto.
- Figura 6.5 Linhas isobáricas no interior da contração
- Figura 7.1 Geometrias de contrações de:
a) Whitehead;
b) Morel;
c) Hussain;
d) Batchelor-Shaw.
- Figura 7.2 Malha de solução para a contração de Whitehead, gerada pelo programa ALGOR
- Figura 7.3 Malha de solução para a contração de Morel, gerada pelo programa ALGOR
- Figura 7.4 Malha de solução para a contração de Hussain, gerada pelo programa ALGOR
- Figura 7.5 Malha de solução para a contração de Batchelor-Shaw, gerada pelo programa ALGOR
- Figura 7.6 Detalhe do mapeamento com o tubo de Pitot
- Figura 7.7 Detalhe da câmara de ensaio
- Figura 8.1 Linhas de iso-velocidades para a contração de Whitehead, gerados pelo programa ALGOR
- Figura 8.2 Linhas de iso-velocidades para a contração de Morel, gerados pelo programa ALGOR

- Figura 8.3 Linhas de iso-velocidades para a contração de Hussain, gerados pelo programa ALGOR
- Figura 8.4 Linhas de iso-velocidades para a contração de Batchelor-Shaw, gerados pelo programa ALGOR
- Figura 8.5 Vetores de velocidade na entrada e saída da contração de Whitehead, gerados pelo programa ALGOR
- Figura 8.6 Vetores de velocidade na entrada e saída da contração de Morel, gerados pelo programa ALGOR
- Figura 8.7 Vetores de velocidade na entrada e saída da contração de Hussain, gerados pelo programa ALGOR
- Figura 8.8 Vetores de velocidade na entrada e saída da contração de Batchelor-Shaw, gerados pelo programa ALGOR
- Figura 8.9 Velocidades adimensionalizadas para a contração de Whitehead, baseada no programa ALGOR e CONTRAC.
- Figura 8.10 Velocidades adimensionais na região próxima à parede e na linha de centro obtidas para a contração de Morel
- Figura 8.11 Velocidades adimensionais na região próxima à parede e na linha de centro obtidas para a contração de Hussain
- Figura 8.12 Velocidades adimensionais na região próxima à parede e na linha de centro obtidas para a contração de Batchelor-Shaw
- Figura 8.13 Perfil de velocidade na saída da contração de Whitehead, obtido com o programa ALGOR

- Figura 8.14 Perfil de velocidade na saída da contração de Morel, obtido com o programa ALGOR
- Figura 8.15 Perfil de velocidade na saída da contração de Hussain, obtido com o programa ALGOR
- Figura 8.16 Perfil de velocidade na saída da contração de Batchelor-Shaw, obtido com o programa ALGOR
- Figura 8.17 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Whitehead para velocidade de saída da contração $U_S=1$ m/s
- Figura 8.18 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Whitehead para velocidade de saída da contração $U_S=10$ m/s
- Figura 8.19 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Morel para velocidade de saída da contração $U_S=2$ m/s
- Figura 8.20 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Morel para velocidade de saída da contração $U_S=10$ m/s
- Figura 8.21 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Hussain para velocidade de saída da contração $U_S=2$ m/s
- Figura 8.22 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Hussain para velocidade de saída da contração $U_S=10$ m/s
- Figura 8.23 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Batchelor-Shaw para velocidade de saída da contração $U_S=10$ m/s
- Figura 8.24 Distribuição de velocidades na saída da contração obtidos no ensaio n° 1

- Figura 8.25 Distribuição de velocidades na saída da contração obtidos no ensaio nº 2
- Figura 8.26 Distribuição tridimensional de velocidades na saída da contração obtidos no ensaio nº 1
- Figura 8.27 Distribuição tridimensional de velocidades na saída da contração obtidos no ensaio nº 2
- Figura 8.28 Perfis de velocidades nas saída da contração, obtidos experimentalmente no ensaio N° 3
- Figura 8.29 a) Perfis de velocidades adimensionais nas saída da contração, obtidos experimentalmente no ensaio N° 3 e pelo programa ALGOR
- Figura 8.29 b) Perfis de velocidades adimensionais na saída da contração de Whitehead, obtidos experimentalmente no ensaio N° 3 e pelo programa ALGOR (para viscosidade dinâmica de $1,8 \times 10^{-5}$ Pa.s e massa específica de $1,2 \text{ kg/m}^3$)
- Figura 8.30 Intensidades de turbulência na saída da contração para velocidade média de $2,5 \text{ m/s}$, obtidos experimentalmente no ensaio N° 4
- Figura 8.31 Intensidades de turbulência na saída da contração para velocidade média de 10 m/s , obtidos experimentalmente no ensaio N° 5
- Figura 8.32 Intensidades de turbulência no eixo longitudinal da contração para velocidade média de $2,5 \text{ m/s}$, obtidos experimentalmente no ensaio N° 4
- Figura 8.33 Intensidades de turbulência no eixo longitudinal da contração para velocidade

média de 10 m/s, obtidos experimentalmente no ensaio N° 5

- Figura 8.34** Espectro de freqüência da flutuação de velocidade nas proximidades da parede da contração
- Figura 8.35** Espectro de freqüência da flutuação de velocidade a uma distância de 4 mm da parede da contração
- Figura 8.36** Aferição dimensional da contração de Whitehead
- Foto 1** Vista frontal da seção de saída da contração com o tubo de Pitot. A escala ao lado direito foi utilizada como referência visual
- Foto 2** Visão da instrumentação. à esquerda o transdutor de pressão utilizado na medição da velocidade; no centro, a mesa de coordenadas X-Y; à direita, detalhe da fixação do tubo de Pitot.
- Foto 3** Detalhe do dispositivo de calibração da sonda de fio quente formado por um bocal de seção de saída de 120 mm²
- Foto 4** Visão da instrumentação de calibração da sonda. À esquerda o transdutor de pressão utilizado na medição da pressão diferencial no bocal; à direita a fonte e a ponte do anemômetro de fio quente.
- Foto 5** Visão geral da bancada de ensaio. Ao fundo à direita a câmara de ensaio; no centro a sonda e a mesa de coordenadas; à esquerda o manômetro eletrônico e a fonte e ponte da sonda de fio quente; à direita abaixo o analisador de espectro.

Foto 6

Detalhe da saída da contração. No centro a sonda de fio quente e a mesa de coordenadas com o prolongador para a medição da intensidade de turbulência no eixo longitudinal da contração.

TABELA DE SÍMBOLOS

a	: coeficiente de pressão admissível na entrada da contração de Whitehead
a_i	: constantes do polinômio da contração de Hussain
A	: constante da curva de calibração do anemômetro de fio quente
A	: área da seção transversal da contração
b	: coeficiente de pressão admissível na entrada da contração de Whitehead
B	: coeficiente angular da curva de calibração do anemômetro de fio quente
c	: relação de contração $c = U_s/U_e$ ou $c = A_e/A_s$
C_f	: coeficiente de atrito
C_p	: coeficiente de pressão
D	: cota do perfil da contração no eixo transversal
E	: valor rms da tensão medida na ponte do anemômetro de fio quente
E'	: valor instantâneo da tensão na ponte do anemômetro de fio quente
e_{rms}	: valor rms da relação ($E'-E$)
f	: função aceleração de Batchelor-Shaw
L_C	: comprimento da contração
n	: constante da função de aceleração de Batchelor-Shaw
N	: grau do polinômio
p	: constante da função de aceleração de Batchelor-Shaw
r	: raio da superfície de revolução
R_x	: número de Reynolds relativo à posição x
u	: flutuação de velocidades turbulentas no eixo longitudinal da contração
u'	: valor rms das flutuações de velocidade no eixo longitudinal da contração
U	: velocidade uniforme na contração
v	: flutuação de velocidades turbulentas no eixo v
v'	: valor rms das flutuações de velocidade no eixo v

V : velocidade do escoamento na contração
 w : flutuação de velocidades turbulentas no eixo w
 w' : valor *rms* das flutuações de velocidade no eixo w
 x : cota do perfil da contração no eixo longitudinal
 x_e : comprimento do trecho reto de entrada da
 contração.
 X : relação entre a distância e a dimensão da entrada
 da contração de Morel
 Y : cota da seção da contração

 δ^* : espessura de deslocamento da camada limite
 $\delta^*_{saída}$: espessura de deslocamento da camada limite na
 saída da contração
 ψ : função de corrente
 μ : viscosidade dinâmica
 μ_1 : razão entre as energias cinéticas turbulentas
 longitudinais
 μ_2 : razão entre as energias cinéticas turbulentas
 transversais
 ϕ : potencial de velocidade
 ν : viscosidade cinemática.
 $\theta_{máx}$: máxima espessura de quantidade de movimento

subscrito:

mín - valor mínimo
 máx - valor máximo
 e - seção de entrada
 s - seção de saída

RESUMO

Este trabalho descreve o estudo de contrações para a geração de escoamento uniforme em túneis de vento. Foram introduzidos aspectos gerais sobre túneis de vento subsônicos, os procedimentos para geração de escoamento uniforme e as várias técnicas de geração de geometrias de contrações.

O objetivo principal deste trabalho foi apresentar uma metodologia de avaliação numérica e experimental aplicada a qualquer geometria de contração. Assim, foram analisadas quatro geometrias de contrações de mesmas dimensões de entrada, saída e comprimento, geradas por técnicas diferentes.

Foram avaliadas numericamente as distribuições de velocidades potenciais nas contrações e nas regiões próximas às paredes, para identificar a formação de gradientes adversos de pressão.

Posteriormente, foram avaliadas numericamente as camadas limite sobre as linhas de simetria das paredes das contrações, em relação a ocorrência de separações.

Foram realizados ensaios em um modelo de contração, onde foram medidos os perfis de velocidades e as intensidades de turbulência na saída, e também, a intensidade de turbulência no eixo longitudinal, sendo verificada a validade da metodologia proposta.

ABSTRACT

This work describes the study of contractions for uniform steady flow generation in wind tunnels. It was shown general aspects of subsonic wind tunnels, the procedures for uniform steady flow generation and techniques for contraction design.

The main purpose of this work was to develop the numerical and experimental and numerical methods for evaluation of contractions, that could be applied to any contraction. Four contractions with the same inlet and outlet dimensions and length, generated by different techniques, were analyzed.

It was evaluated numerically the potential velocity distribution inside the contractions and near the walls, to verify the development adverse pressure gradients.

The boundary layer at the symmetry line of contraction wall was also evaluated numerically, to check for flow separations.

Finally, an experimental analysis of a contraction model also was made. The velocity profile in the outlet of the contraction and the turbulence level at symmetry line were measured, to check the numerical simulations.

1 INTRODUÇÃO

Os estudos aerodinâmicos de corpos ou modelos envolvem, normalmente, investigações experimentais em escoamentos gerados por túneis de vento, tendo como exemplo clássico o estudo de um modelo de uma asa de avião.

O principal ponto a ser considerado antes do início de qualquer experimento em um túnel de vento é se o escoamento gerado é adequado aos objetivos propostos. Esta questão se resume no conhecimento das magnitudes das flutuações de velocidade e da uniformidade do perfil de velocidades.

Conforme será mostrado nos capítulos seguintes, a contração tem um papel destacado na geração do escoamento uniforme.

Apesar desta importância, Wills [35] considera que o projeto de uma boa contração é muito menos entendido que o seu próprio comportamento.

Segundo Hussain e Ramjee [16], os projetistas de túneis de vento afirmam que não há nenhum método de geração de geometrias de contração que prevaleça em relação a outro, em termos de qualidade dos resultados esperados.

Provavelmente, estas afirmações são decorrentes das diferentes concepções e aplicações dos túneis de vento encontradas em "escolas" de projetistas de origem bastante diversas (aeronáutica, automotiva, civil, etc.).

A definição de uma geometria para uma contração é, portanto, uma decisão que ainda tem como "pano-de-fundo" aspectos subjetivos de preferência por este ou aquele método, segundo a tradição de cada linha de projeto. Esta decisão é tomada com base no conhecimento empírico de

pesquisadores que tenham dedicado muito tempo a trabalhos com túneis de vento e identificaram as qualidades e deficiências das diversas contrações com que trabalharam.

A motivação para este estudo foi o projeto de um túnel de vento realizado no Laboratório de Vazão do IPT. Este túnel, denominado TVN1 (Anexo A), foi projetado para ser utilizado em ensaios de aferição de anemômetros e para o estudo do escoamento ao redor de corpos e perfis.

A principal dificuldade enfrentada no projeto do túnel TVN1 foi o projeto e dimensionamento da contração. Inicialmente, foi aplicada a técnica de geração proposta por Whitehead [33], por recomendação de uma autoridade na área, o Professor Michael Gaster, da Universidade de Cambridge.

A utilização da técnica de Whitehead não conduziu a soluções fechadas, sendo encontradas diversas variações de contrações, e muitas dessas poderiam levar a um dimensionamento não adequado.

Decidiu-se então verificar experimentalmente uma das soluções, cuja escolha foi definida por uma avaliação visual das superfícies geradas.

Os resultados desse experimento não se mostraram satisfatórios para o projeto do túnel TVN1, sendo concluído que era necessário uma investigação mais criteriosa sobre os mecanismos que envolvem a geração de escoamento uniforme em um túnel de vento e, mais especificamente, ao problema de dimensionamento da contração.

2 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é o estudo de contrações para geração de escoamento uniforme em túnel de vento, e para tanto, foi desenvolvida uma metodologia de avaliação aplicada a qualquer técnica de geração de geometria de contração.

Esta metodologia poderá ser utilizada como um critério sistemático de dimensionamento e avaliação numérica e experimental de contrações para aqueles que pretendem construir túneis de vento subsônicos.

A partir de uma revisão da literatura, serão apresentadas também algumas considerações sobre túneis de vento e as técnicas de geração de escoamento uniforme, permitindo obter uma visão mais ampla dos problemas relativos aos projetos de túneis de vento.

Para o conhecimento das condições que envolvem o dimensionamento de contrações, será introduzido também o problema do escoamento no interior da contração destacando-se o efeito da curvatura das paredes na separação do escoamento.

Serão discutidas várias técnicas de geração de geometrias de contrações de túneis de vento subsônicos, onde serão descritas as metodologias de dimensionamento e as respectivas aplicações.

Deve-se ressaltar que este trabalho não pretende definir a melhor técnica de geração de geometrias de contração, pois, como foi citado anteriormente, a aplicação de uma geometria de contração só poderia ser justificada após a sua verificação com a metodologia proposta.

3 TÚNEIS DE VENTO

3.1 Introdução histórica [8,24,35]

As primeiras verificações experimentais da ação do escoamento do ar sobre um corpo ou modelo aerodinâmico, foram realizadas no início do século pelos pioneiros da aeronáutica.

Uma das primeiras técnicas experimentais conhecidas, na realização de testes aerodinâmicos foi a haste giratória proposta por Lilienthal (Figura 3.1), onde o modelo era fixado na extremidade da haste e submetido ao movimento de rotação com velocidade constante. Este dispositivo permitia somente uma avaliação visual do comportamento do corpo, não possibilitando uma análise quantitativa das cargas aerodinâmicas, além do que o "escoamento gerado" com o ar estacionário não se aproximava do comportamento do escoamento real.

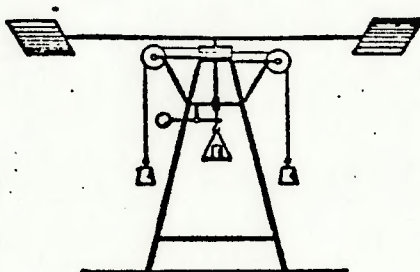


Figura 3.1 Haste giratória de Lilienthal (35)

Na mesma época, foi desenvolvida uma outra técnica para a geração de escoamento que possibilitava a medição das forças aerodinâmicas. Consistia em fixar o modelo em um carro sobre trilhos e movimentá-lo a uma velocidade constante, sendo os instrumentos de medição alojados sobre o mesmo carro. Entretanto, as medições só podiam ser realizadas em um pequeno intervalo de tempo, e não era possível garantir, com confiabilidade, os resultados das medições, uma vez que os instrumentos da época modificavam suas características quando em movimento.

Para a realização de testes com um maior tempo de duração, melhor processo de medição e escoamento mais uniforme, foi necessário desenvolver a técnica de geração de escoamento com modelo estacionário. Um dos primeiros projetos publicados com este método foi o do túnel de vento construído no NPL, *National Physical Laboratory*, por Stanton, em 1903 (Figura 3.2).

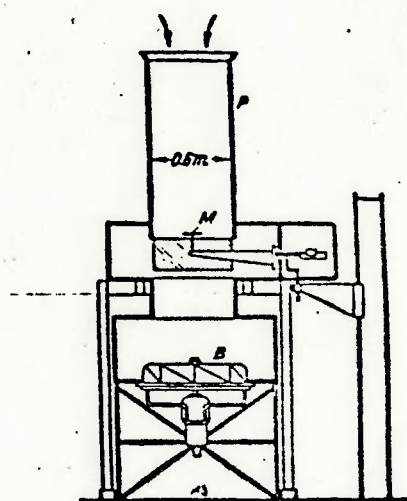


Figura 3.2 Túnel de vento de Stanton (1903) (35)

No equipamento desenvolvido por Stanton, o ar era aspirado através de um pequeno tronco de cone acoplado a um duto cilíndrico, sendo em seguida descarregado numa seção de teste do tipo jato livre e posteriormente num plenum com o ventilador que succionava o ar e o descarregava para a atmosfera. Segundo Stanton, o objetivo do duto cilíndrico era promover um escoamento uniforme na seção de teste, enquanto que o pequeno tronco de cone tinha como finalidade reduzir os efeitos de separação do escoamento na parede de entrada do tubo.

No mesmo período, Prandtl verificou que no túnel de Stanton ocorriam erros na medição de força de arrasto quando os modelos eram de dimensões superiores a 8% do diâmetro do tubo (0,6 m), o que indicava que o escoamento gerado não era uniforme. Prandtl também verificou que as correntes de ar da sala do túnel sobre o funil provocavam instabilidades no escoamento na seção de testes.

Já entre 1907 e 1909, Prandtl construiu o primeiro túnel de vento de circuito fechado, cuja concepção tinha como finalidade a redução da instabilidade do escoamento na seção de testes, introduzindo porém turbulência e turbilhões (*swirl*) gerados nos cantos das paredes e pelo ventilador. Posteriormente foram inseridas uma tela e uma colméia a montante da seção de testes, com a finalidade de reduzir a turbulência de grande escala e a não uniformidade do perfil de velocidade, e uma outra colméia, de maior comprimento, na saída do ventilador, para reduzir os turbilhões.

Entre 1916 e 1917, Prandtl construiu em Göttingen um túnel de vento do tipo jato livre, disposto no plano vertical (Figura 3.3), que é essencialmente semelhante a um túnel de vento moderno, exceto em dois aspectos: o uso de uma seção de testes do tipo jato livre e a fixação do ventilador na saída do primeiro difusor.

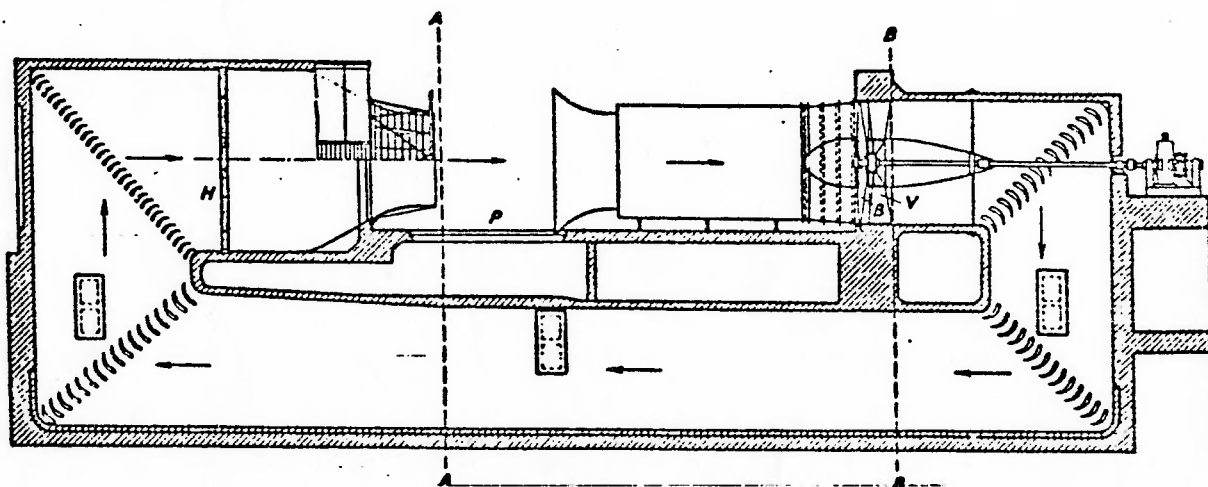


Figura 3.3 Túnel de vento de Göttingen (1916-1917) (35)

A partir desta época inúmeros túneis de vento foram construídos em universidades, centros de pesquisas e nas indústrias aeronáutica e automobilística, com projetos que refletem as soluções propostas inicialmente por Stanton e Prandtl.

A título de exemplo da evolução dos túneis de vento, é apresentada na Tabela 3.1 a quantidade de túneis subsônicos que foram construídos em diversos países, as faixas de potências e as máximas dimensões das seções de teste, cujos dados são descritos por Pope [24], publicado em 1984. No Brasil, entretanto, não se dispõe de dados sobre a quantidade e os tipos de túneis de vento em operação.

Tabela 3.1 túneis de vento subsônicos [24]

País	Entidade	quantidade	potência (hp)	Dimensões da seção de teste (m)
EUA	NASA*	11	280 a 135000	até 25x37
	outros órgãos federais	7	700 a 20000	até 3,6x4,6
	universidades e indústrias	46	15 a 9000	até 8x9
Austrália	órgãos federais e universidades	8	80 a 890	até 2,1x2,7
Canadá	órgãos federais	6	75 a 9200	até 9,1x9,1
	universidades e indústrias	8	7 a 250	até 3,7x4,9
França	órgãos federais universidades e indústrias	11	52 a 6000	até 7,9x16
Índia	órgãos federais universidades e indústrias	7	100 a 1280	até 2,7x 4,3
Itália	órgãos federais universidades e indústrias	9	100 a 2500	até 4,6x15
Japão	órgãos federais universidades e indústrias	30	20 a 4000	até 5,5x6,4
Reino Unido	aeronáutico	14	250 a 17000	até 4,3x4,9
	não aeronáutico	7	100 a 500	até 3,0x4,6
	universidades e indústrias	29	35 a 500	até 2x2,1
Alemanha	órgãos federais universidades e indústrias	8	670 a 5000	até 6,1x9,1

* NASA - National Aeronautics and Space Administration

Pela tabela 3.1 pode-se notar que o maior túnel de vento construído é o da NASA, localizado no campo de Moffett, com seção de teste de 24x37 metros e potência de 135000 hp, podendo atingir a velocidade máxima de 160 km/h, sendo capaz de alojar em sua seção de teste o modelo do *Space Shuttle* em escala real [24].

3.2 Classificação de túneis de vento

Os túneis de vento são utilizados em várias áreas tecnológicas, porém como na indústria aeronáutica se observa a maior quantidade e desenvolvimentos, é comum a classificação dos túneis de vento em aeronáuticos e não aeronáuticos.

Em linhas gerais, uma classificação mais abrangente pode ser feita levando-se em conta as seguintes características dos túneis de vento [24]:

- . forma construtiva: de circuito aberto ou fechado, de jato livre ou com seção de teste;
- . velocidade da seção de teste: subsônicos, sônicos, supersônicos, hipersônicos e transônicos;
- . aplicação: túneis para propósitos gerais, ensaios em baixa turbulência, ensaios de fumaça, ensaios meteorológicos, ensaios pressurizados, ensaios de voo livre, ensaios de "spin", ensaios de estabilidade, ensaios de propulsores, ensaios em baixa temperatura e ensaios de automóveis.

3.3 Exemplos de túneis de vento subsônicos

Um exemplo de túnel de vento subsônico de circuito fechado é o do NPL, com dimensões da seção de testes de 0,9x0,9 m, potência de 26 kW (35 hp), velocidade máxima na seção de testes de 50 m/s, projetado em 1962 para ser utilizado em aplicações gerais, mostrado esquematicamente na Figura 3.4. O ventilador utilizado é do tipo axial com estatores de entrada e saída, com um trecho reto na saída e, logo após, um longo difusor para reduzir a velocidade e a perda de carga.

Foram instalados direcionadores de fluxo nas peças onde há mudança de direção do fluxo de forma a evitar que o escoamento seja perturbado excessivamente.

Para uniformizar o escoamento, foram instaladas duas telas curvas no interior do difusor localizado na entrada da câmara de estabilização para eliminar fluxos preferenciais, além de quatro telas após a colméia para reduzir o nível de turbulência.

A seção de teste foi transformada na forma de octógono para diminuir a influência dos cantos no escoamento.

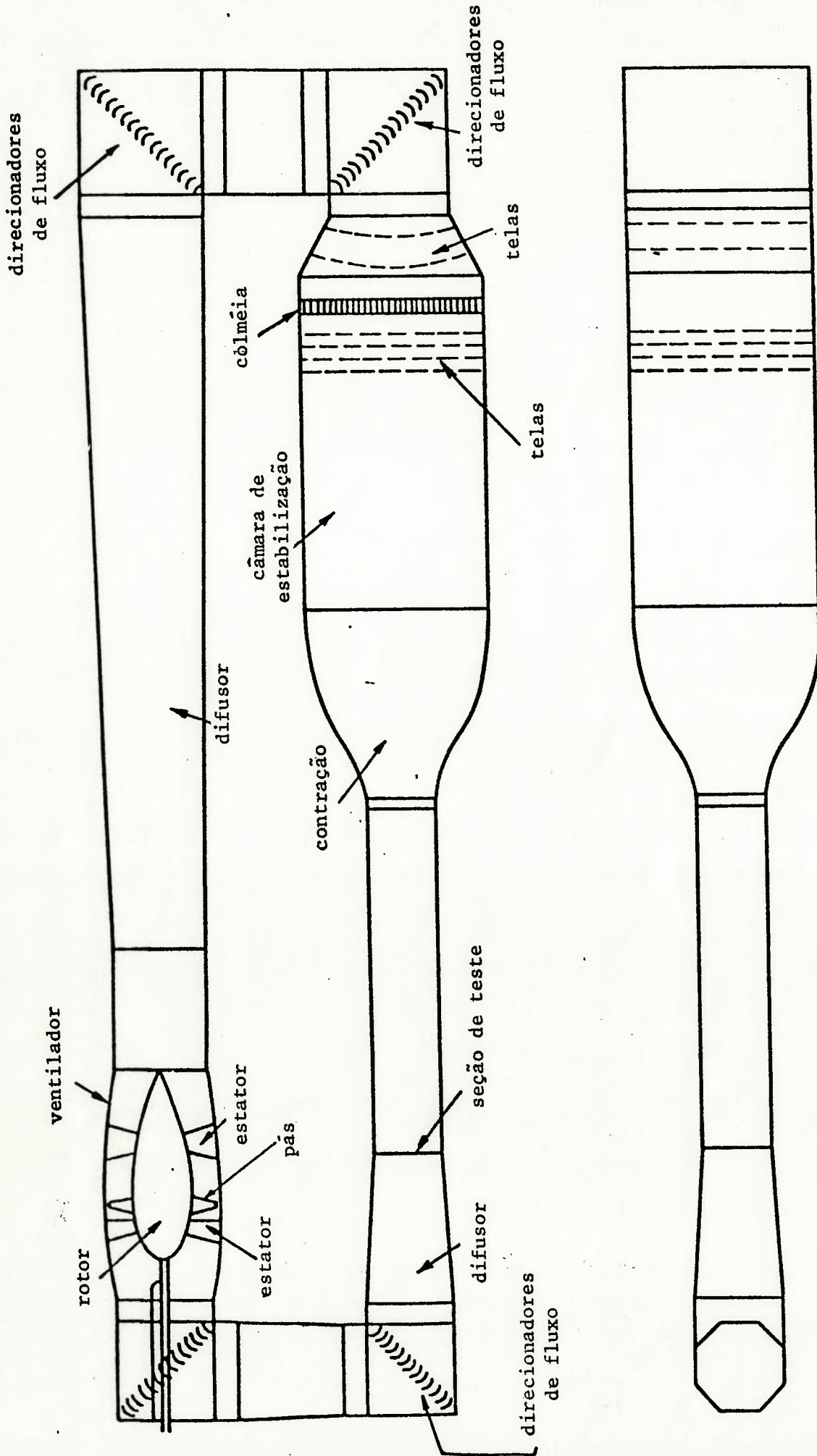


Figura 3.2 túnel de vento de circuito fechado do NPL com dimensões da seção de testes de 0,9x0,9 m (8)

Um outro exemplo de túnel de vento subsônico é o de circuito aberto do NPL projetado por Bradshaw [9], em 1965, destinado ao estudo de camada limite, mostrado na Figura 3.5.

Este tipo de construção remete a túneis de concepção moderna, compostos das seguintes partes: ventilador, difusor, primeiro jogo de telas retificadoras, primeira câmara de estabilização, colméia, segundo jogo de telas, segunda câmara de estabilização, contração, trecho reto, seção de testes e difusor de saída.

Uma das principais características desse projeto foi o uso de um ventilador centrífugo com pá na forma de um aerofólio de 5,5 kW (7,5 hp) de potência, o que segundo Bradshaw, propicia a geração de um escoamento com um menor nível de ruído e de qualidade não inferior a um ventilador axial.

As telas, de mesh 16 e fios 28 SWG, foram instaladas no interior do difusor e imediatamente após à colméia retificadora da câmara de estabilização, e servem eliminar regiões com fluxos preferenciais e reduzir o nível de turbulência.

Foram instaladas duas colméias, uma na saída do ventilador, formada por tubos cilíndricos de 10 mm de diâmetro e comprimento de 75 mm, para alinhar o escoamento ao eixo de simetria do túnel, e outra na entrada da câmara de estabilização, composta por células triangulares 50 x 25 mm 100 mm de comprimento, para reduzir as componentes transversais do escoamento.

Já a contração possui uma relação de área de 9:1, cuja geometria não foi definida no trabalho de Bradshaw, sendo responsável não somente pela aceleração do escoamento, como também, reduzir a não uniformidade do perfil de velocidade e o nível de turbulência do escoamento.

Após a seção de teste foi instalado um longo trecho, cuja finalidade é produzir um escoamento com estabilidade da camada limite, e possibilitar também a dissipação das intensidades turbulentas.

A seção de testes é do tipo retangular e possui dimensões de 0,25 x 0,38 m. A velocidade máxima é de 50 m/s, e a intensidade de turbulência longitudinal é de 0,05%, em relação a uma velocidade de 41 m/s.

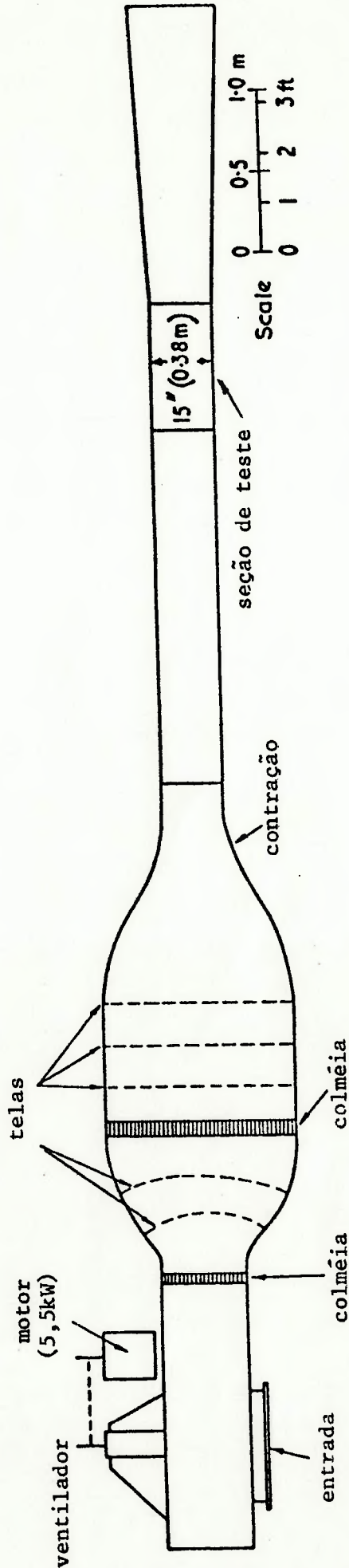
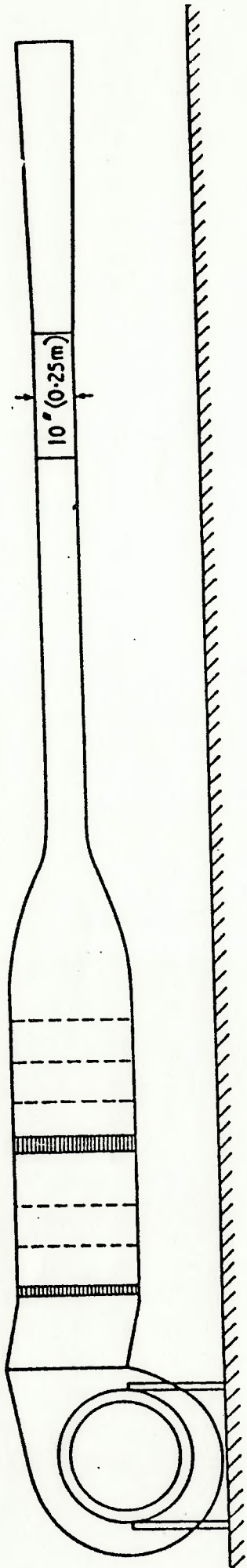


Figura 3.5 túnel de vento de circuito aberto do NPL com dimensões da seção de testes de 0,25x0,38 m (8)

4 GERAÇÃO DE ESCOAMENTO UNIFORME EM TÚNEIS DE VENTO

Para o entendimento das técnicas de geração de escoamento permanente e uniforme em túneis de vento é necessário introduzir algumas considerações sobre flutuações de velocidades e uniformidade do perfil de velocidades em túneis de vento.

4.1 Flutuação de velocidade em túneis de vento

As flutuações de velocidade em túneis de vento podem ser caracterizadas por dois fenômenos: instabilidade de velocidade e turbulência.

A instabilidade é um fenômeno de flutuação da velocidade do fluido, com frequência baixa, podendo ser detectada por manômetros ou transdutores de pressão com resposta às baixas frequências.

Segundo Bradshaw e Pankhurst [8], a instabilidade é um fenômeno provocado principalmente por falhas construtivas e operacionais que provocam a separação intermitente do escoamento em túneis. Ela pode ser gerada, por exemplo, em difusores com ângulos de expansão muito grandes ou pela flutuação na velocidade de rotação do rotor do ventilador, que pode induzir a geração de turbilhões nas esteiras das pás. Outras fontes de instabilidade são a vibração mecânica, normalmente múltiplos e submúltiplos da frequência de rotação do ventilador, o som gerado pelo movimento das pás, provocado pela não uniformidade espacial

do escoamento no interior do ventilador, ondas acústicas provenientes da passagem das pás por fronteiras sólidas (estatores, placas, voluta de ventiladores centrífugos).

A turbulência do escoamento gerado em um túnel de vento, pode ser entendida como um fenômeno de flutuação de velocidade de alta frequência, normalmente muitas vezes superior à frequência de rotação do rotor do ventilador, sendo gerada nas camadas limites das paredes dos circuitos de retorno de túneis de vento de circuito fechado, e em singularidades como colméias, direcionadores de fluxos, telas, ou mesmo nas esteiras de pás de ventiladores. Pode ser também o resultado da natureza aleatória das interações de flutuações de velocidades provocadas por gradientes de temperatura e correntes de convecção.

Segundo Pope [24], um valor recomendado para a intensidade de turbulência longitudinal na seção de teste é de 0,05% da velocidade axial quando o objetivo é o estudo da transição da camada limite, porém, valores ao redor de 0,5% são aceitáveis em pesquisas onde não se necessita uma definição clara dos fenômenos da transição de laminar para turbulento.

4.2 Uniformidade do perfil de velocidade

A uniformidade espacial da velocidade média em um túnel de vento pode ser comprometida por:

- . crescimento excessivo da camada limite, o que acarreta separações, causadas pelo escoamento secundário na interseção das paredes;
- . distribuição não homogênea das células da colméia;
- . imperfeições ou ondulações nas telas retificadoras, resultando em assimetria e escoamentos preferenciais;
- . montagem incorreta do ventilador centrífugo, de forma que escoamento não esteja alinhado com o eixo de simetria do túnel.

Segundo Bradshaw e Pankhurst [8] para um túnel de vento de alta qualidade, os valores recomendados para a não uniformidade do perfil de velocidade, numa região afastada das paredes da seção de teste, situam-se entre 0,1 a 0,2% da velocidade média, enquanto Pope [24], recomenda valores entre 0,2 e 0,3%.

4.3 Procedimentos para obtenção de escoamento uniforme em túneis de vento

Ao se projetar um túnel de vento com baixo nível de turbulência, automaticamente se assegura a uniformidade do perfil de velocidade média, uma vez que as técnicas disponíveis para se reduzir a turbulência são similares às utilizadas para reduzir variações espaciais da velocidade.

Dessa forma estas técnicas e procedimentos podem ser relacionadas como segue:

- . instalação de uma colméia condicionadora de escoamento, preferencialmente com células de geometria hexagonal e baixa perda de carga;
- . instalação de telas, com coeficientes de perda de carga devidamente selecionados, para anular áreas com fluxo preferencial e turbilhões;
- . utilizar trechos retos após a colméia e as telas, para a dissipação das esteiras de vórtices geradas por estes elementos;
- . uso de um ventilador com baixo nível de ruído, bem balanceado e convenientemente instalado, além de se certificar que não haja flutuação da rotação do rotor;
- . o uso de materiais absorventes acústicos e de vibração, uma vez que túneis de vento com paredes de concreto ou de chapas metálicas possuem um tempo de reverberação extremamente longo. Dessa forma pode-se evitar o fenômeno de tubo de órgão que já foi observado em vários túneis de vento [8];
- . as superfícies internas devem ser homogêneas, e com um bom acabamento superficial, se possível com baixa rugosidade, devendo-se evitar a formação de ressaltos e ondulações;
- . evitar a formação de cantos vivos responsáveis pela geração de escoamentos secundários. Quando for necessário o uso de seções retangulares deve-se

"quebrar" os cantos, transformando a seção até a forma de um octógono;

- . instalação de direcionadores de fluxo nos trechos onde há mudança de direção do escoamento, no caso de túneis de circuito fechado;
- . eliminação da estratificação do escoamento provocada por gradientes de temperatura;
- . balanceamento do escoamento no circuito de retorno ou da sala no caso de um túnel de circuito aberto, evitando-se a formação de escoamentos preferenciais;
- . instalação do túnel de vento em ambientes que não possuam correntes de ar que possam induzir instabilidades no escoamento;
- . construção da seção de teste na forma de um difusor com uma pequena inclinação (ao redor $0,1^\circ$), ou succionando o ar na superfície, de forma a evitar o crescimento excessivo da camada limite;
- . uso de uma contração bem projetada a montante da seção de testes.

5 ESTUDO DE CONTRAÇÕES

No capítulo anterior foram descritos os fenômenos indesejáveis em um túnel de vento e as ações corretivas para se reduzir os seus efeitos no escoamento da seção de teste.

Neste capítulo será apresentado o comportamento do escoamento no interior da contração e algumas considerações sobre separação de escoamento.

5.1 As idealizações de Prandtl e Batchelor

Prandtl, em 1917, utilizou pela primeira vez uma contração para acelerar o escoamento em um túnel de vento e em 1933, demonstrou que a contração tinha um papel importante na redução da não uniformidade do perfil de velocidade, como ilustrado na Figura 5.1 a), e quantificada como uma função direta do quadrado da relação contração c [16,25], ou seja:

$$\frac{(U_2 - V_2)U_2}{(U_1 - V_1)U_1} = \frac{V_1 + U_1}{V_2 + U_2} \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{1}{c^2} \quad (5.1)$$

onde: U_1 é a velocidade média na seção de entrada;
 U_2 é a velocidade média na seção de saída;
 V_1 é a distorção da velocidade na entrada;
 V_2 é a distorção da velocidade na saída;
 c é a relação de contração ou seja, $c = U_2/U_1$

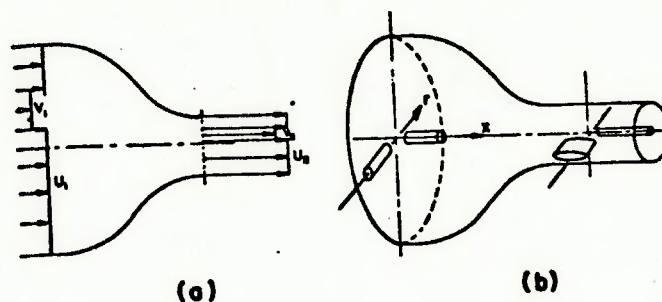


Figura 5.1
 a) não uniformidade da velocidade média na contração
 b) estiramento de filamentos de vórtices (*vortex stretching*) no interior da contração (16)

Prandtl também idealizou que a presença da contração modifica a intensidade da turbulência da entrada da contração, e quantificou esta propriedade como sendo:

$$\frac{u_s'}{u_e'} = \frac{1}{c} \quad ; \quad \frac{v_s'}{v_e'} = \frac{w_s'}{w_e'} = \sqrt{c} \quad (5.2)$$

onde:

u_e' e u_s' são os valores *rms* das flutuações de velocidade de entrada e saída respectivamente, no eixo axial da contração

v_e' e v_s' são os valores *rms* das flutuações de velocidade transversais de entrada e saída respectivamente, no eixo v ;

w_e' e w_s' são os valores *rms* das flutuações de velocidade transversais de entrada e saída respectivamente, no eixo w .

Para tanto, Prandtl admitiu que a turbulência característica em uma contração axissimétrica pode ser entendida como sendo um estiramento de filamentos de vórtices (*vortex stretching*) axiais e radiais, representados esquematicamente na Figura 5.1 (b), sendo que as flutuações de velocidades u' são devidas aos filamentos de vórtices alinhados radialmente, e as flutuações v' e w' são devidas aos vórtices axiais.

Pelas expressões (5.1) e (5.2), Prandtl concluiu que a contração é, quantitativamente, mais eficaz na redução da não uniformidade da velocidade média quando comparada com a redução da turbulência longitudinal. Já em relação à turbulência transversal ele concluiu que há uma elevação da sua intensidade.

Já nos trabalhos de Comte-Bellot [12] e Wills [35] as intensidades turbulentas longitudinais e transversais são relacionadas em termos da energia cinética turbulenta, como segue:

$$\mu_1 = \frac{u_s'^2}{u_e'^2} = \frac{3}{4c^2} \left(\frac{1+\alpha^2}{2\alpha^3} \log \frac{1+\alpha}{1-\alpha} - \alpha^{-2} \right) \quad (5.3)$$

$$\mu_2 = \frac{v_s'^2 + w_s'^2}{v_e'^2 + w_e'^2} = \frac{3}{4}c + \frac{3}{4c^2} \left(\frac{1}{2\alpha^2} - \frac{1-\alpha^2}{4\alpha^3} \log \frac{1+\alpha}{1-\alpha} - \alpha^{-2} \right) \quad (5.4)$$

onde: $\alpha^2 = 1 - \frac{1}{c^3}$

c - relação de contração;

μ_1 e μ_2 - razão entre as energias cinéticas turbulentas longitudinais e transversais;

u_e , v_e e w_e - flutuações de velocidades turbulentas de entrada;

u_s , v_s e w_s - flutuações de velocidades turbulentas de saída.

Estas relações foram desenvolvidas por Batchelor [16,25] a partir da Teoria Linear da turbulência de Taylor, a qual prevê que a energia cinética turbulenta longitudinal decresce no interior da contração, ao contrário da transversal que aumenta.

As relações propostas por Prandtl e por Batchelor podem induzir, inicialmente, à conclusão de que a qualidade do escoamento em uma contração é função somente da relação de contração e das características do escoamento de entrada como uniformidade do perfil de velocidade e intensidade de turbulência. Porém, notadamente, o escoamento é viscoso e compressível, com regiões com possibilidade de descolamento e com escoamentos secundários nos cantos.

5.2 O escoamento no interior das contrações

Intuitivamente, pode parecer que uma transição suave de seção de entrada e saída da contração pode gerar, sem dificuldades, um escoamento uniforme na seção de teste do

túnel de vento. Entretanto, em contrações de comprimentos finitos a velocidade na região da parede a montante da contração não acelera uniformemente, tendo um ponto de mínima velocidade na região próxima da entrada da contração, e um ponto de máxima velocidade na saída, conforme mostrado na Figura 5.2.

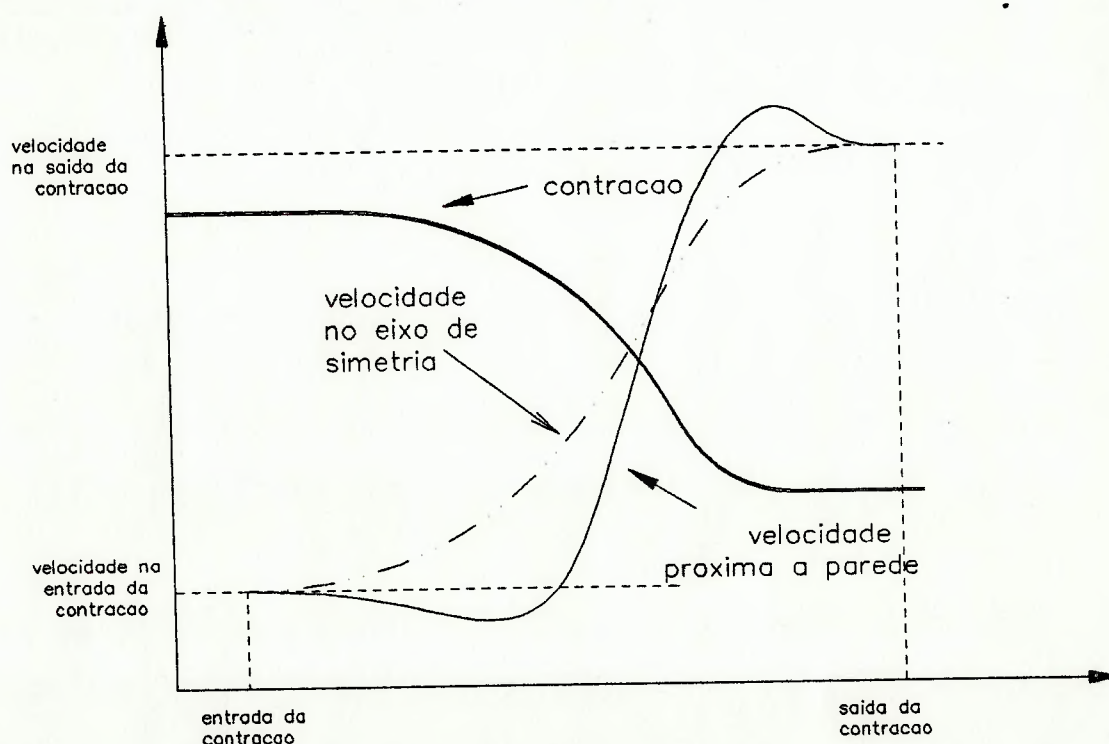


Figura 5.2 Distribuição de velocidade na parede e no eixo de uma contração finita

Segundo Wills [35], a explicação para este comportamento é que a linha de corrente em relação à parede permanece paralela à mesma até a entrada da contração, enquanto as linhas mais internas tendem a se curvar numa região anterior à entrada, de forma similar ao comportamento das linhas de corrente do escoamento sobre um cilindro. Assim, as velocidades nas linhas de corrente próximas à parede começam a diminuir, e a pressão tende a aumentar conforme

mostra a equação de Bernoulli. A mesma justificativa pode ser dada para o comportamento das linhas de corrente próximas à parede, imediatamente antes da saída da contração.

Morel [20], justifica este comportamento em função da característica elíptica da equação diferencial que rege o escoamento. Esta equação é denominada de equação de Beltrami-Stokes para o escoamento potencial, cuja formulação axissimétrica é dada por:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = 0 \quad (5.5)$$

onde:

ψ - função de corrente;

r - raio da superfície de revolução;

x - eixo longitudinal.

Esta equação não admite como condição de contorno o escoamento paralelo na entrada da contração, ou seja $v=0$.

Assim, as curvaturas das contrações modificam as linhas de corrente na entrada, produzindo uma distorção do perfil de velocidade nas regiões próximas à parede na entrada e saída da contração, tendo como resultado, a geração de gradientes de pressão.

As magnitudes desses gradientes de pressão poderão produzir separações no interior da contração e assimetrias dos perfis de velocidades na saída.

Na região central da contração o escoamento é acelerado quase uniformemente, podendo porém ser afetado caso as separações ocorram de forma muito intensa.

Idealmente, pode-se imaginar que uma contração de comprimento infinito não provocaria a formação de gradientes de pressão, pois as curvaturas tenderiam a zero. Porém, no caso real, o atrito viscoso induzirá o aparecimento de separação, afetando assim a qualidade do escoamento.

Independentemente do problema da existência de gradientes de pressão, pode-se considerar que a contração é o principal elemento de um túnel de vento, pois é nela que o escoamento sofre as maiores modificações de comportamento: aceleração, mudanças de direção, aparecimento de componentes transversais de velocidade e, alguns casos, a mudança de regime laminar para turbulento.

Assim, como a contração é instalada imediatamente a montante da seção de testes, todos os cuidados no tratamento do escoamento poderão ser desperdiçados se a contração não garantir pelo menos a manutenção da qualidade do escoamento.

Em suma, as geometrias e as dimensões das contrações determinam a qualidade, as limitações e as aplicações dos túneis de vento.

5.3 Separação no escoamento devido a curvatura da parede

A curvatura da parede da contração pode provocar a formação de gradientes adversos de pressão e por consequência induzir a separação do escoamento. Segundo White [32] esta separação do escoamento pode ser entendida pela aplicação da equação de momento bidimensional próxima à parede, onde $u=v=0$,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{y=0} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (5.6)$$

O primeiro termo da equação (5.6), que é a curvatura do perfil de velocidade na parede ($y=0$), é diretamente proporcional ao gradiente de pressão. Portanto, o gradiente de pressão define o comportamento do perfil de velocidade na região da parede como mostrado na Figura 5.3 a).

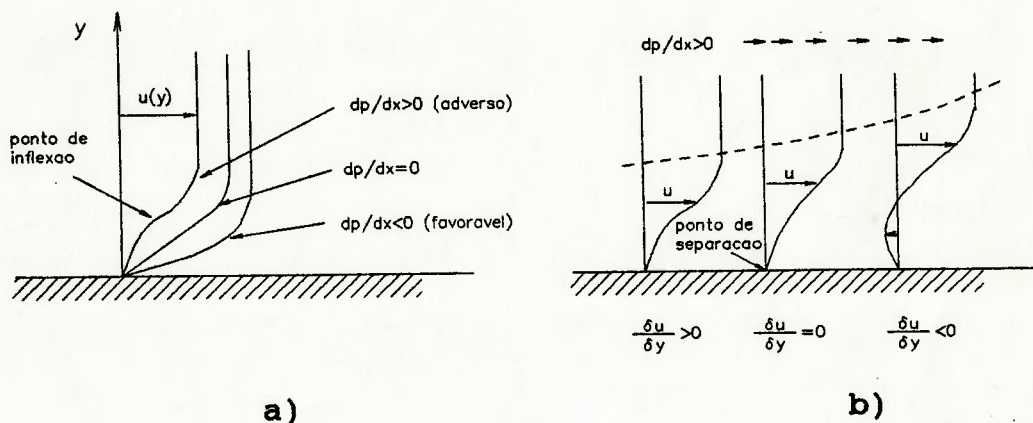


Figura 5.3

- a) tipos de perfis de velocidade provocados por de pressão;
 b) sequência de formação de escoamento reverso devido à existência de gradientes adversos de pressão.

As condições necessárias para a definição da forma do perfil de velocidade na parede (Figura 5.3 a)) podem ser explicadas pelas características dos gradientes de pressão, ou seja:

. $dp/dx < 0$ (favorável)

O perfil de velocidades tem curvatura negativa em toda extensão da camada limite, é levemente curvado e estável, não indicando possibilidade de separação do escoamento.

. $dp/dx = 0$

O perfil de velocidade tem curvatura zero na região próxima à parede e na proximidade do bordo superior da camada limite possui curvatura negativa.

. $dp/dx > 0$ (adverso)

O perfil de velocidade tem curvatura positiva na região próxima à parede, mas podendo ser negativa na região do bordo superior da camada limite, originando a formação de um ponto de inflexão. O perfil é instável, e dependendo da magnitude do gradiente adverso de pressão o ponto de inflexão se afastará da parede, até ser atingida uma condição de escoamento reverso. Assim, para satisfazer a equação da continuidade, o escoamento descola afastado da parede, próximo ao ponto de inflexão onde $(\delta u / \delta y)_w = 0$. Além deste ponto, o escoamento principal se afasta da parede, de forma que as equações da camada limite não são mais válidas.

Da análise de White pode-se concluir que a separação do escoamento ocorre com facilidade na existência de gradientes positivos de pressão (adversos) que podem ser provocados pelas curvaturas da parede da contração.

Em escoamento laminar a ocorrência de separação é rápida, enquanto que num escoamento turbulento a separação pode resistir a grandes gradientes adversos de pressão, mas às custas de elevados coeficientes de atrito.

5.4 O critério de separação de Stratford

Stratford [28] analisou a separação da camada limite turbulenta e mostrou que numa região de gradiente adverso de pressão V_p , a camada limite turbulenta pode ser dividida em duas regiões distintas, denominadas I e E na Figura 5.4 b):

. interna

as forças de inércia são pequenas de forma que o perfil de velocidade é distorcido pelo gradiente de pressão até que este seja balanceado pelo gradiente de tensão de cisalhamento. O equacionamento da camada limite nesta região, com a ocorrência de separação, é que a velocidade próxima à parede é proporcional à raiz quadrada da distância da parede, ao contrário do que ocorre no escoamento laminar com separação, onde a velocidade é proporcional ao quadrado da distância da parede;

externa

a elevação da pressão provoca uma diminuição da velocidade, e as perdas devida às tensões de cisalhamento são praticamente iguais às perdas no escoamento sobre uma placa plana. Assim o equacionamento do escoamento é obtido de forma similar ao escoamento de uma placa plana, e a relação resultante é similar ao caso de escoamento laminar.

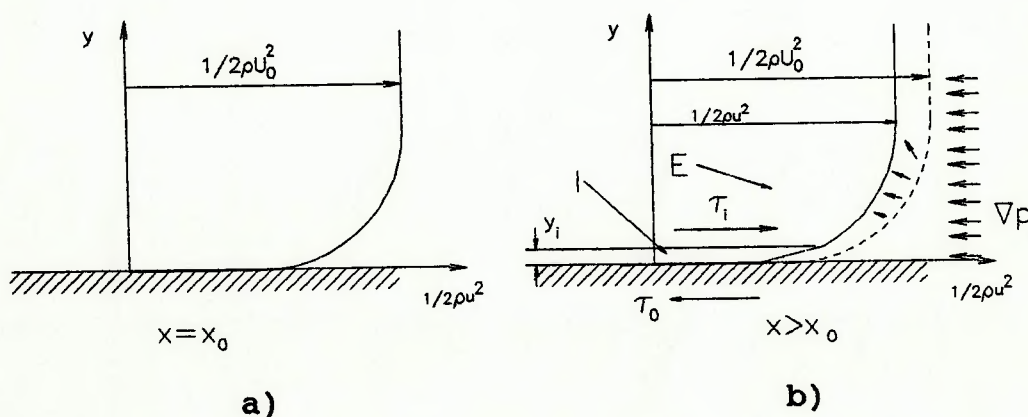


Figura 5.4 Seqüência do desenvolvimento da camada limite na presença de um gradiente de pressão para $x = x_0$ e $x > x_0$

Se o gradiente de pressão for elevado poderá ocorrer a separação e a formação de um escoamento reverso (recirculação) conforme mostra a Figura 5.5 a).

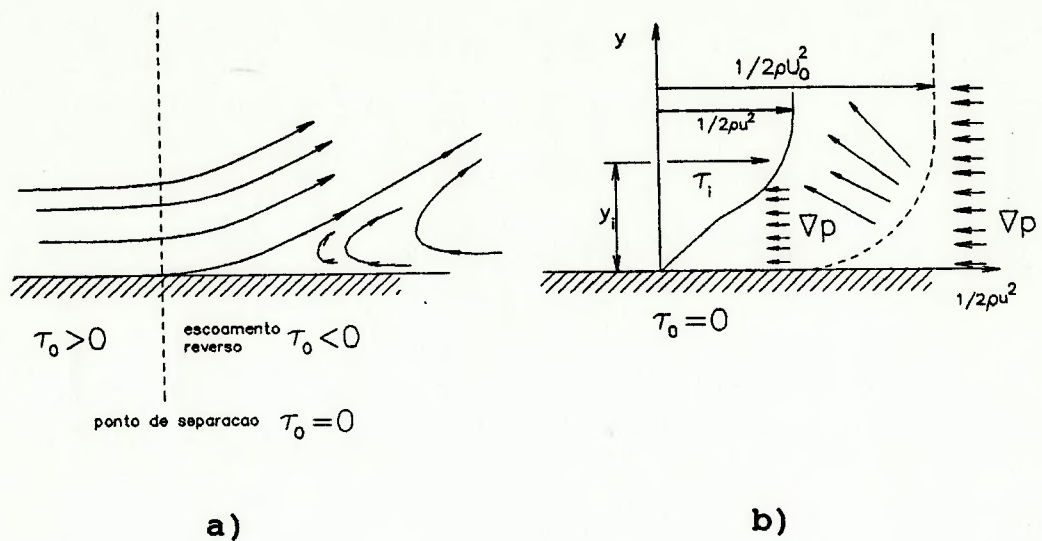


Figura 5.5
 a) A separação do escoamento com escoamento reverso
 b) o balanço de força

Assim, no esquema mostrado na Figura 5.5 b), o escoamento atinge a condição de separação (coeficiente de atrito igual a zero) quando a força ($y_i \nabla p$) pode ser balanceada pela diferença de tensão de cisalhamento ($\tau_i - \tau_0$) se τ_0 for zero. Stratford verificou que a condição para ocorrência da separação no escoamento turbulento na presença de um gradiente de pressão, pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$\text{para } \frac{d^2 p}{dx^2} \geq 0 \quad \text{e} \quad C_p \leq \frac{4}{7} \quad (5.7)$$

$$C_p \left[x \frac{dC_p}{dx} \right]^{0.5} = 0,39 (10^{-6} R_x)^{0.1}$$

para $\frac{d^2 p}{dx^2} < 0$

$$C_p \left[x \frac{dC_p}{dx} \right]^{0,5} = 0,35 (10^{-6} R_x)^{0,1} \quad (5.8)$$

sendo, $C_p = 1 - \left[\frac{U}{U_m} \right]^2$ e $R_x = \frac{U_m x}{\nu}$

onde:

C_p : coeficiente devido ao gradiente de pressão;

p : pressão;

R_x : número de Reynolds relativo à posição x ;

U_m : velocidade onde se inicia o gradiente de pressão

x : distância do ponto onde se inicia a camada limite
turbulenta;

ν : viscosidade cinemática.

As equações 5.7 e 5.8 são denominadas como o Critério de Stratford da separação da camada limite turbulenta, que foi aplicado em vários trabalhos, como poderá ser visto no capítulo seguinte.

6 TÉCNICAS DE GERAÇÃO DE GEOMETRIAS DE CONTRAÇÕES

As primeiras contrações foram construídas baseadas na intuição dos projetistas, como no caso do túnel de vento de Prandtl em 1917, mostrado na Figura 3.3.

A medida que os experimentos em túneis de vento se tornavam mais complexos, vários pesquisadores e projetistas procuraram utilizar modelos do escoamento potencial para a avaliação do escoamento no interior das contrações, com o objetivo de formular metodologias de projetos otimizados.

Uma outra técnica de geração de geometrias é baseada nas equações de polinômios que controlam a distribuição das curvaturas nas paredes das contrações. Morel [20] é o maior defensor desta técnica e considera que os modelos baseados no escoamento potencial geram formulações matemáticas "elegantes", que apesar disso não métodos práticos e nem estabelecem critérios otimizados na definição de geometrias e comprimentos de contrações.

Conforme será mostrado, a quase totalidade das contrações construídas se basearam em projetos axissimétricos e bidimensionais, onde os resultados foram convenientemente ajustados de forma a gerar uma contração tridimensional. No caso do projeto de uma contração de seção quadrada é de se esperar que se pode obter resultados satisfatórios quando da utilização de técnicas axissimétricas ou bidimensionais.

6.1 Classificação das contrações

As contrações podem ser divididas em três tipos: axissimétricas, bidimensionais e tridimensionais, sendo que esta distinção é obtida em relação ao tipo de equacionamento utilizado pelos respectivos autores para o escoamento no interior da contração. Uma outra classificação pode ser feita em relação à forma como as geometrias são geradas: a técnica visual, técnica de aceleração uniforme do escoamento da linha de centro, técnica dos hodógrafos e a técnica de geração de geometria por polinômios [8,20,29].

Na tabela 6.1 são apresentadas algumas contrações classificadas conforme o tipo, em ordem cronológica, com os respectivos autores e a técnica utilizada na geração da geometria.

Tabela 6.1 - Classificação das geometrias de contrações

TIPO	AUTOR	ANO	TÉCNICA
axissimétricas	Tsien	1943	aceleração
	Szczeniowski	1943	aceleração
	Smith	1944	aceleração
	Batchelor e Shaw	1944	aceleração
	Twaites	1946	aceleração
	Rouse e Hassan [26]	1949	polinômio
	Whitehead [33]	1951	hodógrafo
	Cohen e Ritchie [11]	1962	aceleração
	Bossel [6]	1969	aceleração
Morel [20]	1975	polinômio	
bidimensionais	Lighthill	1945	aceleração
	Whitehead [33]	1951	hodógrafo
	Libby e Reiss	1951	hodógrafo
	Jordinson [17]	1961	hodógrafo
	Lau [18]	1964	aceleração
	Morel [21]	1977	polinômio
tridimensionais	Sanderse	1977	polinômio
	Downie e Jordinson	1984	polinômio
	Batill e Hoffman [2]	1986	polinômio
	Su [29]	1991	polinômio

As contrações axissimétricas desenvolvidas por Tsien, Szczeniowski, Smith, Batchelor-Shaw, Twaites e Cohen-Ritchie se baseiam na obtenção da solução da equação de Beltrami-Stokes para o escoamento potencial axissimétrico (equação 5.5), admitindo-se uma função de aceleração do escoamento na linha de simetria. Já os métodos bidimensionais de Whitehead, Libby-Reiss e Jordinson aplicam a técnica de solução do escoamento no plano hodógrafo.

Serão detalhadas a seguir as principais técnicas de geração de geometrias de contrações e os principais estudos encontrados na literatura.

6.2 Técnica visual

As contrações construídas pela técnica visual, envolvem considerações subjetivas de como o escoamento se desenvolve no interior da contração [20,35], e são frutos da sensibilidade dos projetistas e também do amadurecimento obtido após longos períodos de verificações experimentais. Segundo Bradshaw e Pankhurst [8], alguns cuidados devem ser tomados na utilização desta técnica:

- . o raio de curvatura da parede na saída da contração deverá ser menor que o raio de curvatura da parede de entrada;
- . os raios de curvatura da parede na entrada da contração deverão ser grandes o suficiente para assegurar que o escoamento seja praticamente axial;
- . no caso de uma contração de seção retangular o raio de curvatura da maior superfície deverá ser maior que o raio de curvatura da outra superfície.

Em 1989 Bell e Mehta [4], estudaram numérica e experimentalmente o desenvolvimento da camada limite nas seções de testes de quatro túneis de vento subsônicos, sendo que dois destes possuíam contrações construídas pela técnica visual, e outros dois com contrações geradas por

polinômios de grau 5. Um destes túneis, com contrações geradas pela técnica visual, está localizado na NASA (EUA), voltado principalmente para o estudo de camada cisalhante (*shear layer*), e outro no Imperial College (Inglaterra) utilizado no estudo de camada limite. Os resultados experimentais demonstraram que a qualidade do escoamento gerado por estas duas contrações são compatíveis ao dos túneis com contrações de geometrias polinomiais.

6.3 Técnica da análise de semelhança

6.3.1 Semelhança geométrica

Segundo Galea [14] uma solução simplificadora para os projetos de novas contrações, é o dimensionamento pela análise de semelhança geométrica com outras contrações já construídas.

Por outro lado, a aplicação desta solução para contrações com relações de contração diferentes, pode conduzir a resultados ruins, pois não se pode garantir que o escoamento se comportará de forma semelhante ao escoamento na contração original.

Esta técnica reflete, em síntese, o desconhecimento de alguns projetistas de túneis de vento dos mecanismos que envolvem o dimensionamento de uma contração.

6.3.2 analogia elétrica

O estudo do escoamento através da analogia elétrica se baseia no fato de que o fluxo da corrente elétrica através de um elemento condutor e homogêneo segue o mesmo modelo do escoamento irrotacional de um fluido. Conforme pode ser visto na Figura 6.1. Neste caso, a taxa da variação do potencial elétrico dE/ds ao longo de qualquer linha do caminho da corrente elétrica é proporcional a taxa de variação no potencial de velocidade $d\phi/ds$ ao longo da linha de corrente equivalente.

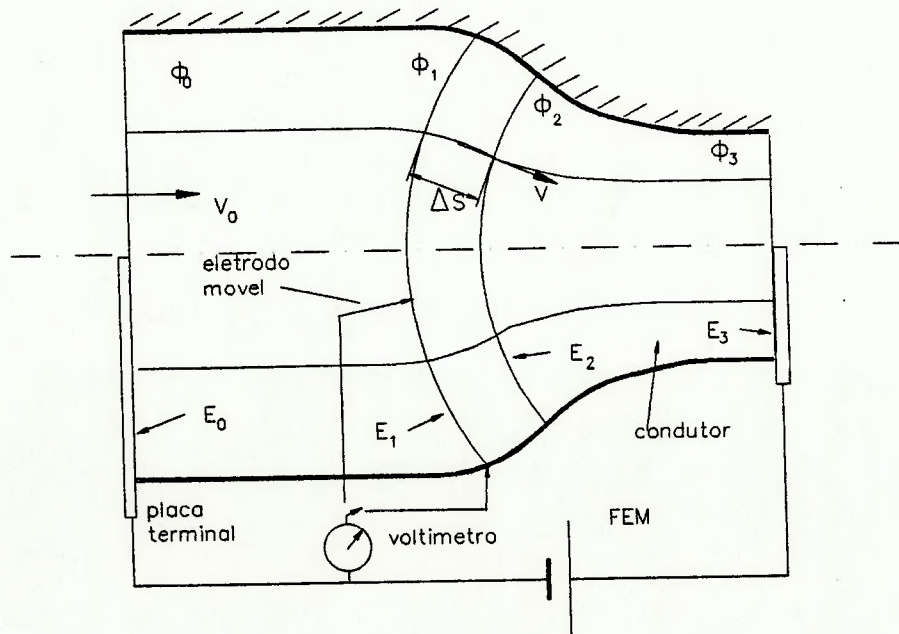


Figura 6.1 representação esquemática da analogia entre o escoamento irrotacional e o fluxo de corrente para uma contração bidimensional

Uma vez que a velocidade v é proporcional à taxa de variação do potencial de velocidade, ela será proporcional à taxa de variação do potencial elétrico, ou seja,

$$v = \frac{\Delta\phi}{\Delta s} \approx C \frac{\Delta E}{\Delta s}$$

$$\frac{v}{v_0} \approx \frac{\Delta E}{\Delta E_0} \quad (6.1)$$

onde:

- v : velocidade;
- v_0 : velocidade na entrada da contração;
- E : potencial elétrico;
- E_0 : potencial elétrico na entrada da contração;
- ϕ : potencial de velocidade;
- s : linha de corrente;
- C : constante de proporcionalidade.

6.3.3 Estudo de House e Hassan

Em 1949, House e Hassan [26] publicaram um estudo do escoamento pela analogia elétrica em contrações tendo como principal objetivo evitar a formação do fenômeno de cavitação.

Apesar da utilização da contração para escoamento de água, os resultados podem ser estendidos aos problemas de separações do escoamento com ar, pois a formação da cavitação ocorre devido a existência de elevados gradientes de pressão no interior da contração.

No trabalho de House e Hassan foram avaliadas, através da analogia elétrica, duas geometrias de contrações: a elíptica e a da equação cúbica ($y=ax^3$).

No experimento foi utilizado um perfil flexível, que simulava os perfis das contrações, imersa num líquido condutor, e foram medidas as diferenças de potenciais elétricos ao longo do seu comprimento, em relação ao eletrodo de referência.

House e Hassan concluíram que a melhor contração é da forma de equação cúbica, pois possui uma menor perda de pressão na entrada devido ao raio de curvatura na entrada tender ao infinito, propiciando uma menor tendência de descolamento do escoamento.

6.4 Técnica da aceleração uniforme

6.4.1 Estudo de Cohen e Ritchie

Cohen e Ritchie [11], em 1962, projetaram uma contração para um túnel de vento de circuito fechado de baixa velocidade (60 m/s) do *Northampton College of Advanced Technology*, em Londres. A contração, com seção transversal de um octógono irregular, possuía uma relação de área de 7,4 e um comprimento de 3,2 m, e foi projetada para garantir que o escoamento gerado fosse de baixa turbulência.

Embora Cohen e Ritchie denominem o projeto como tridimensional, aplicaram basicamente as técnicas axissimétricas de Tsien e Szczeniowski, que se baseiam na solução por séries (separação de variáveis) das equações de

Beltrami-Stokes do escoamento potencial, a partir de uma distribuição de velocidade axial previamente escolhida.

6.4.2 Estudo de Lau

Lau [18], em 1964, desenvolveu uma metodologia bidimensional de projeto de contrações, baseada na técnica de aceleração uniforme na linha de centro. O escoamento foi analisado no plano complexo, onde foram adicionados ao escoamento paralelo fontes com intensidades diferentes e igualmente espaçadas, de forma a produzir um contorno.

Lau concentrou o estudo na obtenção das linhas de corrente sem ocorrência dos gradientes adversos de pressão, o que acarretou em soluções onde o comprimento das contrações tendiam ao infinito, e no caso de aplicações práticas ele sugere o truncamento, ou uma melhor distribuição das fontes.

Lau não apresentou nenhuma aplicação prática que pudesse validar o seu método.

6.4.3 Estudo de Bossel

Bossel [6], em 1969, construiu duas contrações axissimétricas com relações de área c de 16 e 36, onde c é a razão das áreas de entrada e saída, com diâmetro de entrada de 0,6 m e comprimento de 0,95 m, que foram

projetadas segundo à técnica de aceleração uniforme de Thwaites com solução do escoamento potencial segundo o método de separação de variáveis, o mesmo utilizado por Tsien, Szczeniowski e Cohen e Ritchie.

A contração de relação de área de 36 teve o seu contorno modificado, pois Bossel verificou, analiticamente, que existia um aumento significativo da velocidade próxima à parede na saída da contração.

Com o intuito de se certificar do tipo de escoamento gerado, Bossel ensaiou a contração de relação de área de 16, e verificou que o perfil de velocidade na saída da contração se desviou em 1% e 3% nos pontos de 80% e 95% do raio de saída, respectivamente, sendo que o valor previsto no projeto era de 0,3%, enquanto que o nível de turbulência foi inferior a 0,25%.

6.4.4 Estudo de Chmielewski

Chmielewski [10], em 1974, especificou uma forma de acelerar o escoamento de forma quase unidimensional no interior da contração. Esta técnica de aceleração foi desenvolvida originalmente por Batchelor e Shaw e é definida da seguinte forma:

$$\left(\frac{D_c}{D}\right)^4 = (c^2 - 1) \frac{F(x)}{F(x_c + L_c)} + 1 \quad (6.2)$$

onde $x_c \leq x \leq (x_c + L_c)$

$$e \quad F(x) = \int_{x_e}^x f(x) dx$$

sendo a função aceleração dada por:

$$f(x) = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \cos 2\pi \cdot \left(\frac{x - x_e}{L} \right)^n \right] \right\}^p$$

onde:

- c - relação de contração;
- D - cota do perfil da contração no eixo transversal;
- D_e - dimensão de entrada da contração;
- D_s - dimensão de saída da contração;
- L_c - comprimento da contração;
- n - constante da função de aceleração de Batchelor-Shaw;
- p - constante da função de aceleração de Batchelor-Shaw;
- x - cota do perfil da contração no eixo longitudinal;
- x_e - comprimento do trecho reto de entrada da contração;
- f(x) - função aceleração.

Os parâmetros n e p, da função aceleração, controlam as curvaturas de entrada e saída da contração.

Na análise de Chmielewski foram adotados os seguintes valores: n=1; 2 e 4; p=0,5; 0,8 e 1,4; c=5 e L_c/D_e=1. Posteriormente, foram fixados n=4 e p=0,8 e variado 2<c<25 para obter valores de (L_c/D_e) mínimos para a não ocorrência da separação.

Para a solução do escoamento potencial, Chmielewski utilizou longos trechos retos de dutos na entrada e saída da contração, de forma a assegurar o escoamento paralelo. Como a distribuição de velocidade era de campo potencial, foi possível verificar pelo critério de Stratford [28], as possibilidades de separação da camada limite.

Chmielewski verificou que para se evitar a formação de separação devido aos gradientes adversos de pressão deveria ser reduzida a curvatura da entrada e aumentada a curvatura da saída, com o compromisso de garantir o menor comprimento da contração, ou seja a mesma recomendação dada por Pankhurst [8] no caso de construção de contrações pela técnica visual.

No estudo desenvolvido por Chmielewski, foi assumido que o escoamento na entrada da contração era uniforme e não afetado pela presença da contração, além de não considerar a turbulência típica na entrada da contração e assumir que a camada limite na entrada é laminar. Estas hipóteses não correspondem às situações reais observadas em túneis de vento, podendo enfraquecer o método de avaliação proposto.

6.4.5 Estudo de Ramjee e Hussain

Ramjee e Hussain [25], em 1976, estudaram o efeito da relação de contração na geração do escoamento, utilizando uma única geometria baseada no método proposto por Batchelor-Shaw.

Ranjee e Hussain ensaiaram cinco contrações com a mesma dimensão da seção de entrada (254 mm) e as seguintes relações de contração: 11; 22; 44,5; 64 e 100. Os comprimentos das contrações eram de 190 mm, com exceção da contração de relação de área igual a 11 que tinha 178 mm.

Verificaram que a energia cinética turbulenta (longitudinal, transversal, e total) aumentava ao longo da contração, e a elevação era cada vez mais acentuada à medida que a relação de contração aumentava, ao contrário do que prevêem as idealizações de Prandtl e Batchelor, apresentado item 5.1.

Com este estudo, concluíram que para a efetiva redução das intensidades turbulentas, deve-se verificar outros fatores: um melhor projeto do ventilador, ângulos menores para difusores, diminuição da vibração em placas, blindagem acústica, câmaras de estabilização, etc..

As investigações de Ranjee e Hussain se limitaram a uma única geometria e praticamente a um único comprimento, de forma que os resultados não podem ser conclusivos e extensivos a qualquer geometria de contração. Aparentemente, os resultados indicam que ocorreram separações nos escoamentos e por consequência fizeram com que as intensidades turbulentas aumentassem.

6.5 Técnica do hodógrafo

6.5.1 Estudo de Whitehead

Whitehead et al. [33], em 1951, desenvolveram métodos para projetos de contrações bidimensionais e axissimétricas. Os projetos bidimensionais são baseados em técnicas de transformações conforme, onde o escoamento é resolvido pelo método das imagens no plano hodógrafo, e as cotas da contração são obtidas retornando a solução do plano hodógrafo ao plano físico.

O método tridimensional utiliza o potencial de velocidade e a função de corrente do escoamento bidimensional como variáveis independentes, sendo a equação da função de corrente tridimensional resolvida aproximadamente, admitindo-se que a contração seja axissimétrica.

Em ambos casos, métodos bi e tridimensional, a parede curva é de comprimento finito com seções paralelas a montante e a jusante. São considerados os efeitos dos gradientes de pressão próximos às paredes de entrada e saída da contração.

Segundo Whitehead, com este método pode-se gerar uma boa uniformidade na distribuição de velocidade na saída, e também evitar o descolamento da camada limite. É assumido que o escoamento é sem atrito, sendo que para escoamentos reais as formas podem ser modificadas por um leve deslocamento da parede para fora, permitindo a acomodação da camada limite.

Whitehead compara em seu trabalho uma contração com relação de área 4:1 com as geometrias desenvolvidas por Lighthill e Cheers, mostrada na Figura 6.2. Como se pode notar, o seu método conduz a mais rápida mudança de seção próxima à região central, de forma que o escoamento é sensivelmente acelerado. Entretanto, todas as três curvas se aproximam das extremidades de entrada e saída de forma suave.

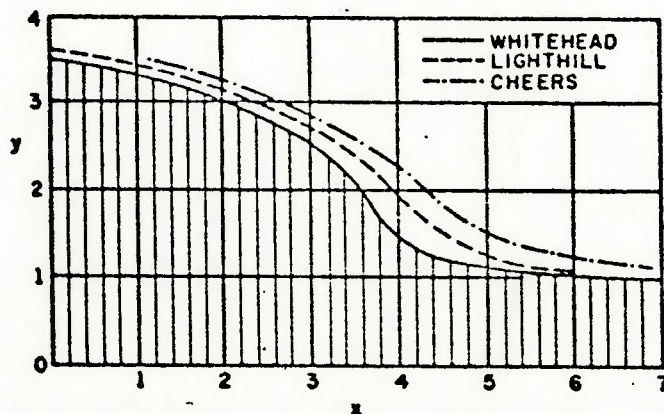


Figura 6.2 Comparação das contrações de Whitehead, Lighthill e Cheers. (33)

No apêndice A é apresentado com mais detalhes a metodologia de Whitehead e o programa CONTRAC desenvolvido no projeto do túnel de vento TVN1 para a geração de geometrias de contrações.

6.5.2 Estudo de Jordinson

Jordinson [17], em 1961, especificou um método bidimensional baseado no método do hodógrafo. Para tanto, ele dividiu o problema em duas regiões: a entrada e a saída da contração. Na entrada foi considerado que o escoamento paralelo, matematicamente representado por uma fonte localizada no infinito, era influenciado por um sorvedouro, localizado sobre o eixo da contração. Na saída foi admitida a existência de um sorvedouro localizado no infinito. Com o ângulo de inclinação da contração escolhido, e as dimensões de entrada e saída é possível determinar as linhas, no plano hodógrafo, que representam as superfícies de entrada e saída no plano físico. Para a definição do comprimento da contração, Jordinson admitiu que as duas geometrias de entrada e saída poderiam ser unidas por uma reta, formando assim um tronco de cone na região central.

Jordinson desenvolveu esta técnica de geração de contração para o projeto de um túnel de vento destinado à visualização de escoamento, e não utilizou o método de Whitehead pois este gera contrações com inclinações de parede muito acentuados, para o caso de elevadas relações de área (> 15), o que, segundo Jordinson, não é conveniente para este tipo de túnel de vento.

6.6 Técnica de polinômios

6.6.1 Estudo de Morel

Morel [20], em 1975, desenvolveu uma família de soluções para projeto de contrações axissimétricas utilizando-se também do critério de separação da camada limite de Stratford, para garantir que não haja descolamento.

Para obter estas soluções Morel utilizou um método numérico por técnicas de diferenças finitas que utiliza a equação de Euler, tendo como condições de contorno o perfil de velocidades de entrada, geometria inicial da contração, pressão de estagnação, temperatura (no caso admitida constante) e a vazão mássica.

Ele utilizou para a geração da geometria da contração seis famílias de curvas, todas variando na forma de x^N , com N igual 2; 2,5; 3; 3,5; 4 e 5. Os contornos das contrações foram obtidos através de duas curvas que se interseccionam em um determinado ponto x_m , a ser devidamente escolhido.

Morel obteve inicialmente as soluções do escoamento potencial para valores de relação de contração entre 2 a 25, de relação de comprimento e dimensão de entrada (L_C/D_e) entre 0,75 e 1,25 e das relações X ($=x_m/L_C$) entre 0,12 e 0,8. A partir dessas soluções foram calculadas as distribuições de pressão e os coeficientes de pressão de entrada e saída C_{p_e} e C_{p_s} , respectivamente, como segue:

$$C_{pe} = 1 - (V_e/U_e)^2 \quad C_{ps} = 1 - (V_s/U_s)^2 \quad (7.3)$$

onde:

V_e e V_s são a mínima e máxima velocidade na entrada e saída da contração, respectivamente;

U_e e U_s são as velocidades uniforme na entrada e saída da contração, respectivamente.

De posse dos coeficientes de pressão, Morel construiu várias cartas, tendo como parâmetros as relações X e L_c/D_e , para várias relações de contração. Ele sugere que os valores máximos recomendados de C_{pe} e C_{ps} , para que não haja separação, sejam 0,39 e 0,06, respectivamente. Porém estes valores foram calculados para garantir uma uniformidade do perfil de velocidade de saída de 2%, o que, segundo Morel, é um valor conveniente.

Adicionalmente, dentre as geometrias de polinômios, a mais conveniente, segundo Morel, é a forma cúbica, mostrada na figura abaixo.

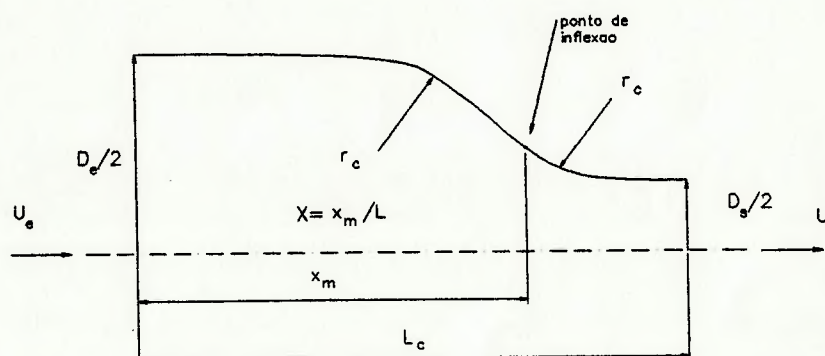


Figura 6.3 Contorno da contração construída por dois arcos cúbicos

Para o tratamento dos efeitos da turbulência e da camada limite, Morel sugere a aplicação do conceito "comprimento total do bocal", que consiste na inserção de trechos retos na entrada e saída da contração. Na verdade, o que Morel define é a necessidade da instalação da câmara de estabilização a montante da contração, onde ocorrem os decaimentos ou dissipações das esteiras de vórtices gerados nas telas ou colméias. Em relação ao trecho reto na saída da contração, Morel definiu uma região onde o escoamento não é mais afetado pelas curvaturas das paredes da contração, de modo que a camada limite possa se desenvolver de uma forma mais uniforme.

Em 1977, Morel [21] desenvolveu um estudo bidimensional para obtenção de uma família de soluções de geometrias de contrações baseadas no polinômio de terceiro grau. Morel analisou numericamente 120 configurações e utilizou a mesma metodologia do estudo axissimétrico para analisar o problema da separação do escoamento. Os resultados demonstraram que existem diferenças entre o tratamento do escoamento na forma axissimétrica e na forma bidimensional, como por exemplo: as distâncias onde ocorrem o máximo e mínimo gradiente de pressão são ao redor 60% maiores que no caso axissimétrico, o comprimento do trecho reto na saída da contração deverá ser 20% maior que na metodologia axissimétrica.

Tulapurkara e Bhalla [30], em 1988, investigaram experimentalmente duas contrações axissimétricas com relações de área de 12 e 3,46 construídas segundo a técnica

proposta por Morel. Os resultados indicaram que não ocorriam separações no escoamento e a uniformidade do perfil de velocidade, na saída da contração, era inferior a 1%, melhor portanto que os 2% previstos por Morel.

6.6.2 Estudos de Hussain e Ramjee

Hussain e Ramjee [16] em 1976, realizaram um estudo para verificar o efeito da forma da contração na geração do escoamento. Eles ensaiaram quatro tipos de formas com a mesma relação de contração: a forma de um polinômio de grau 3 ($a+bx+cx^2+dx^3$), o método proposto por Batchelor e Shaw, e dois tipos de bocais propostos pela ASME - *American Society of Mechanical Engineering*, que são utilizados em medição de vazão, conforme indicado na Figura 6.4.

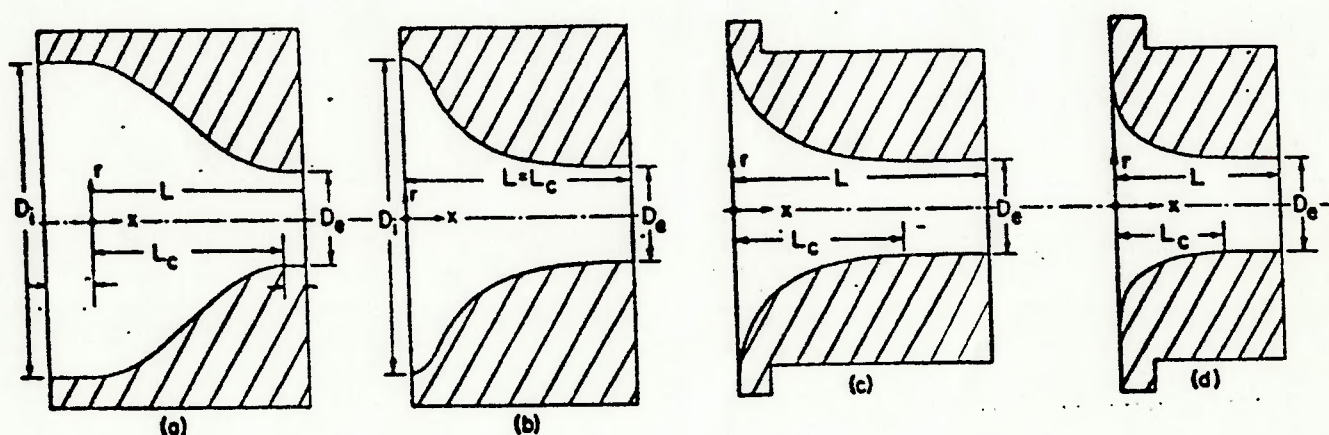


Figura 6.4 As quatro geometrias de contração utilizadas por Hussain e Ramjee [16] : a) polinômio de grau 3, b) forma de Batchelor-Shaw, c) ASME raio longo, d) ASME raio curto.

Hussain e Ramjee verificaram que a geometria da contração não afeta significativamente a velocidade média do escoamento central, mas a geometria de forma de polinômio apresentou a menor espessura da camada limite e também a menor intensidade turbulenta.

6.6.3 Estudo de Mikhail e Rainbird

Mikhail e Rainbird [19] em 1978, também desenvolveram técnicas que permitiram avaliar o comportamento da camada limite nas contrações axissimétricas. Verificaram que era importante o controle sobre as curvaturas ao longo da superfície da contração, capaz de minimizar os efeitos dos gradientes de pressão nas paredes.

O comprimento da seção de saída da contração foi determinado de forma a garantir 0,25% de uniformidade do escoamento na linha de centro a uma distância de um raio da saída.

Esta técnica, de forma geral, aplica o mesmo método de avaliação de Morel, sendo porém utilizada em geometrias cuja derivada segunda da coordenada é regida por uma função do tipo:

para a seção de entrada

$$R'' = A_1(1 + B_e Z_1) [\sin(\pi Z_1)]^{N_e} \quad (6.4)$$

para a seção de saída

$$R'' = A_2(1 + B_s Z_2) [\sin(\pi Z_2)]^{N_s} \quad (6.5)$$

onde:

A_1 e A_2 são constantes a serem determinadas para que a curvatura na entrada e saída da contração seja igual a zero;

B_e e B_s , N_e e N_s são parâmetros que controlam a distribuição de curvatura da superfície da contração.

6.6.4 Estudo de Batill e Hoffman

Batill e Hoffman [2], em 1986, desenvolveram famílias de soluções através de cartas, de forma semelhante ao estudo de Morel, porém aplicadas a contrações tridimensionais.

Também aplicaram o critério de Stratford para geometrias de contrações obtidas através da intersecção de dois polinômios de terceiro grau (recomendado por Morel), com relações de contração variando de 10 a 40.

Os gradientes adversos de pressão foram avaliados por um método numérico de simulação do escoamento potencial tridimensional.

Um parâmetro extra, o fator de forma da seção transversal, foi acrescentado no desenvolvimento das soluções, que trata o problema das contrações com seções retangulares.

6.6.5 Estudo de Su

O mais recente trabalho encontrado é o desenvolvido por Su [29], em 1991, que trata de forma mais geral o estudo do escoamento potencial tridimensional em contrações de seções retangulares. Também utilizou o critério de Stratford para avaliar a possibilidade de separação da camada limite.

As geometrias de contrações se basearam nas de arcos de polinômios na forma de x^N estudadas por Morel, com $N=3; 5; 7$ e 9 , cuja formulação é dada pelas seguintes equações:

$$F = \begin{cases} 1 - \frac{(x/L_c)^N}{X^{N-1}} & 0 \leq x/L_c \leq X \\ 1 - \frac{(1-x/L_c)^N}{X^{N-1}} & X \leq x/L_c \leq 1 \end{cases} \quad (6.6)$$

sendo: $F=(H-H_S)/(H_e-H_S)$ ou $F=(B-B_S)/(B_e-B_S)$

$X= X_h$ ou $X= X_b$

onde:

H_e e H_S as dimensões das alturas das seções de entrada e saída, respectivamente, da contração;

B_e e B_S as dimensões das larguras das seções de entrada e saída, respectivamente, da contração;

X_h e X_b são as relações adimensionais entre distâncias onde ocorre as intersecções dos polinômios e o comprimento da contração, à partir da entrada da contração;

x é a posição no eixo longitudinal;

L_c é o comprimento da contração.

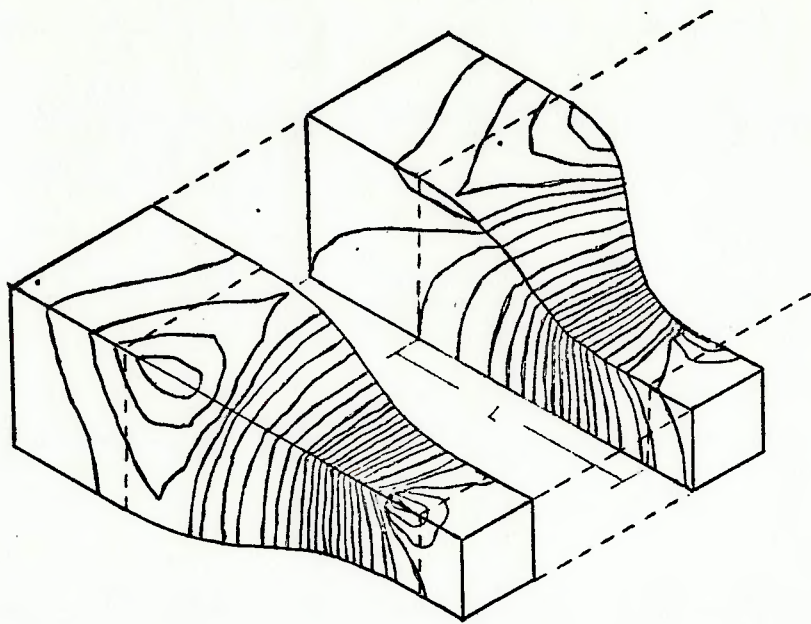
Su analisou o escoamento no interior das contrações variando os seguintes parâmetros:

- . relação de contração (para valores de 3 , 6 e 12);
- . relação entre o comprimento e diâmetro hidráulico da contração (para valores de 0,4; 0,7 e 1,4);
- . potência N do polinômio ($N=3; 5; 7$ e 9);
- . fatores de forma de largura e altura (para valores de 1; 1,5; e 2,5);
- . relações adimensionais dos pontos de intersecção (para valores 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8).

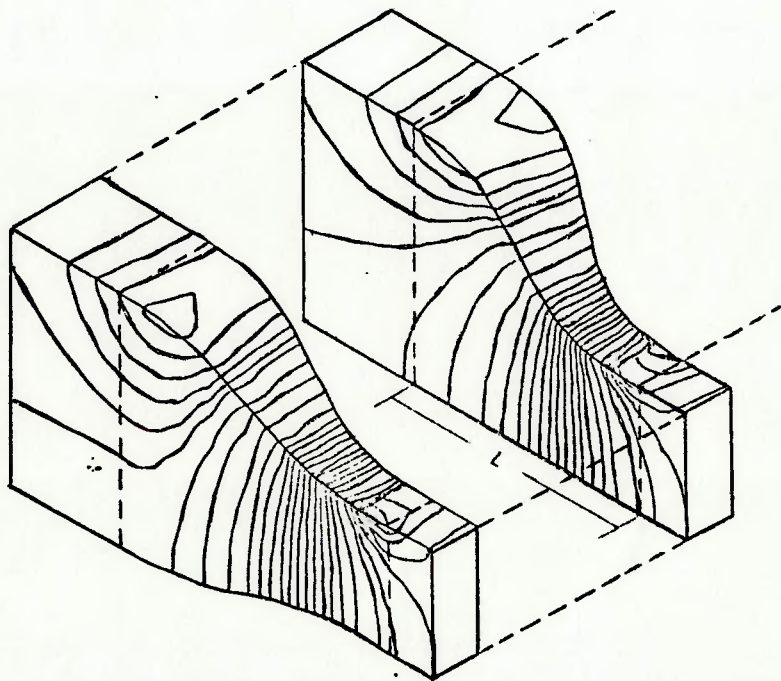
Su concluiu que para atenuar a formação de escoamentos secundários nos cantos deve-se:

- . utilizar relações de contração baixas;
- . maiores valores da relação entre o comprimento e diâmetro hidráulico da contração;
- . utilizar a geometria de polinômios de grau 3;
- . menores valores de fatores de forma, ou seja, se aproximar de uma seção quadrada;
- . maiores valores das relações adimensionais dos pontos de intersecção dos polinômios.

Na figura 6.5 é mostrada a distribuição de linhas isobáricas em contrações de seções quadrada e retangular (fator de forma igual 2,5).



a) seção quadrada;



b) seção retangular.

Figura 6.5 linhas isobáricas no interior da contração (29)

7 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE GEOMETRIAS DE CONTRAÇÕES

Ao contrário das metodologias propostas por Morel e Su que buscaram a generalização das soluções através do uso de adimensionais em geometrias de contrações geradas por polinômios, neste trabalho pretende-se propor uma metodologia de análise numérica e experimental que possa ser aplicada a qualquer geometria de contração, sendo dada ao projetista a liberdade de escolha do tipo de geometria. Com intuito de verificar a validade desta metodologia, foram analisados quatro tipos de geometrias de contrações, com as mesmas dimensões de entrada, saída e comprimento, concentrando-se portanto o estudo nas diferenças das características geométricas importantes: o perfil das paredes e as curvaturas.

A "inspiração" partiu do trabalho de Prandtl no desenvolvimento da teoria da camada limite, ou seja, todos os efeitos viscosos foram concentrados numa camada próxima às superfícies sólidas, enquanto o escoamento ao longe era resolvido como sendo potencial.

Portanto, este estudo foi dividido em três fases:

- Numa primeira etapa, foram realizadas simulações numéricas do escoamento potencial bidimensional no interior das quatro geometrias de contrações. À partir destas simulações foram obtidas as distribuições de velocidades próximas às superfícies, para identificar e quantificar os gradientes de pressão nas entradas e

saídas das contrações ou seja, foi resolvido o "far field" ou campo distante de velocidades;

- . Na segunda etapa deste trabalho, foi analisado numericamente o comportamento da camada limite nas superfícies das contrações ou seja, foi resolvido o "near field" ou campo próximo de velocidades, através de um método numérico para escoamento bidimensional viscoso, laminar ou turbulento. Esta investigação objetivou a verificação da possibilidade de ocorrência de separações, provocadas pelos efeitos viscosos e pelos gradientes de pressão, que não foram considerados nas análises numéricas na primeira etapa;
- . Na terceira etapa, foi efetuada a investigação experimental do escoamento gerado por um modelo de contração que gerou a contração do TVN1, com respeito a uniformidade do perfil de velocidades, a intensidade de turbulência e a identificação de flutuações de velocidade. Foi escolhido este modelo de contração pois, como foi citado no capítulo 1, no seu primeiro ensaio experimental os resultados não foram satisfatórios, sendo que esta metodologia experimental permitiu verificar, mais precisamente, as condições que levaram a esta conclusão.

Foram definidas para as demais contrações as mesmas dimensões do modelo de contração do TVN1, para garantir que as análises numéricas fossem concentradas nas diferenças

dos perfis e curvaturas e eliminando-se três parâmetros: as dimensões de entrada e saída e o comprimento da contração. Não foram testadas experimentalmente outras contrações pois o objetivo da terceira etapa é verificar a validade dos resultados experimentais, podendo assim, ser realizada em qualquer geometria de contração. Além do que, foi recomendado pela Banca Examinadora do Exame de Qualificação que os ensaios experimentais deveriam ser realizados em apenas uma contração.

7.1 Geometrias de contrações

As geometrias escolhidas para serem verificadas numericamente são:

- . técnica do hodógrafo do TVN1 - Whitehead;
- . polinômio na forma ax^3 - Morel;
- . polinômio na forma $a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^2$ - Hussain;
- . aceleração uniforme do escoamento central - Batchelor-Shaw.

Para facilitar o entendimento e a indentificação, as contrações serão denominadas pelos nomes dos seus autores, como no caso de Whitehead e Batchelor-Shaw, e no caso das geometrias de polinômios pelo nome dos divulgadores, sendo denominados a partir de agora como a contração de Whitehead, contração de Morel, contração de Hussain e contração de Batchelor-Shaw.

A escolha das contrações se deu com base nos seguintes argumentos:

- . são técnicas que aplicam conceitos e metodologias muito diferentes;
- . foram verificadas numérica e experimentalmente por outros autores, sendo uma importante fonte de informações para uma possível análise comparativa;
- . as contrações de Morel e Hussain são muito utilizadas por causa da facilidade de projeto, apesar de que conceitualmente, não possuem nenhum fundamento teórico que justifique as suas geometrias;

As formulações e os parâmetros de dimensionamento são apresentadas na Tabela 7.1, a seguir:

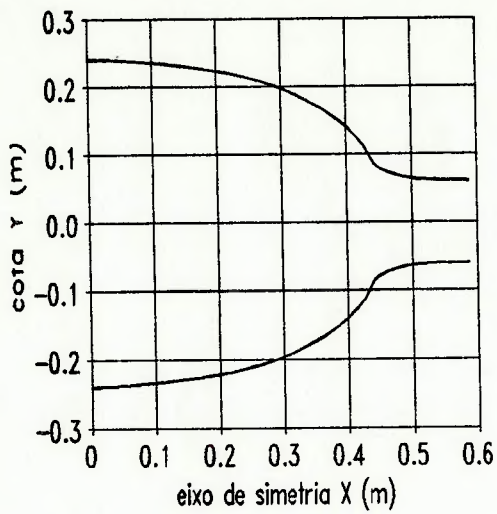
Tabela 7.1 Metodologia de geração das contrações

Geometria	parâmetros	equacionamento
Whitehead	$D_e=0,48$ m $D_s=0,12$ m $C_{pe}=a=0,05$ $C_{ps}=b=0,05$	programa CONTRAC
Morel	$D_e=0,48$ m $D_s=0,12$ m $C_{pe}=0,05$ $C_p=0,05$ $X=0,7451$ $L_c=0,588$ m	$\frac{D-D_s}{D_e-D_s} = 1 - \frac{1}{X^2} \cdot \left(\frac{x}{L_c}\right)^3 \quad \text{para } \frac{x}{L_c} \leq X$ $\frac{D-D_s}{D_e-D_s} = 1 - \frac{1}{(1-X)^2} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_c}\right)^3 \quad \text{para } \frac{x}{L_c} > X$
Hussain	$D_e=0,48$ m $D_s=0,12$ m $L_c=0,588$ m	$\frac{D}{2} = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3$ <p>condições de contorno :</p> $x = 0 \Rightarrow D = D_e \text{ e } \frac{dD}{dx} = 0$ $x = L_c \Rightarrow D = D_s \text{ e } \frac{dD}{dx} = 0$
Batchelor-Shaw	$D_e=0,48$ m $D_s=0,12$ m $L_c=0,588$ m $n=2$ $p=0,8$ $c=16$ $x_e=0,12$ m função aceleração: $f(x) = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \cos 2\pi \left(\frac{x-x_e}{L} \right)^n \right] \right\}^p$	$\left(\frac{D_e}{D}\right)^4 = (c^2 - 1) \frac{F(x)}{F(x_e + L_c)} + 1$ <p>onde $x_e \leq x \leq (x_e + L_c)$</p> $F(x) = \int_{x_e}^x f(x) dx$

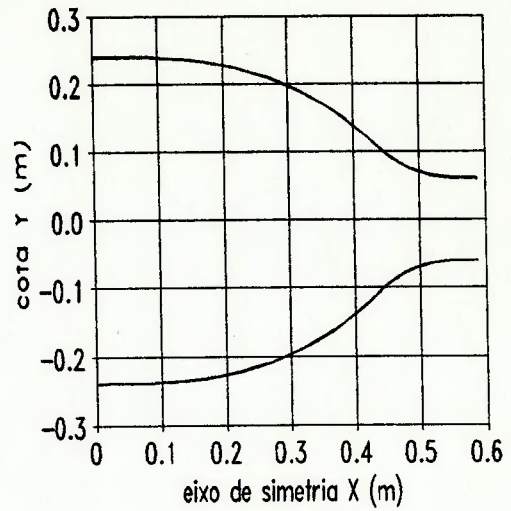
onde:

- a_i - constantes do polinômio de Hussain, determinados a partir das condições de contorno;
- c - relação de contração no caso bidimensional;
- $C_{pe}=a$ - coeficiente de pressão admissível na entrada das contrações de Morel e Whitehead;
- $C_{ps}=b$ - coeficiente de pressão admissível na saída das contrações de Morel e Whitehead;
- D - cota do perfil da contração no eixo transversal;
- D_e - dimensão de entrada da contração;
- D_s - dimensão de saída da contração;
- L_C - comprimento da contração;
- n - constante da função de aceleração de Batchelor-Shaw;
- p - constante da função de aceleração de Batchelor-Shaw;
- X - relação entre a distância da entrada da contração de Morel onde ocorre a intersecção dos polinômios e comprimento da contração (x_m/L_C);
- x - cota do perfil da contração no eixo longitudinal;
- x_e - comprimento do trecho reto de entrada da contração.

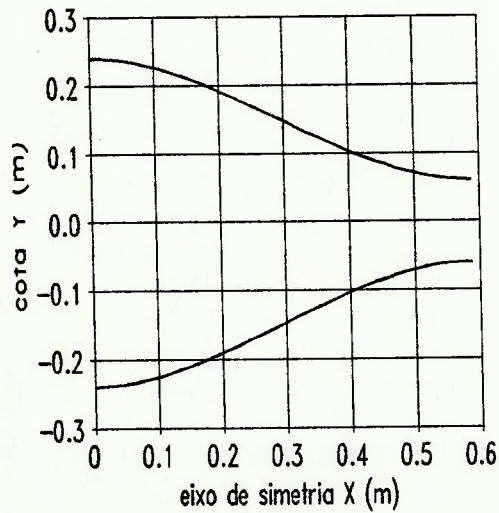
Foram realizados os cálculos com as formulações apresentadas na Tabela 7.1, sendo que as dimensões de cada contração são apresentadas no Anexo D, e os perfis gerados podem ser vistos na Figura 7.1.



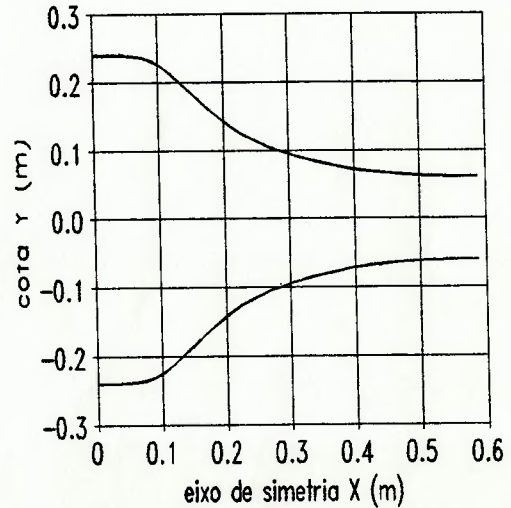
a) Whitehead



b) Morel



c) Hussain



d) Batchelor-Shaw

Figura 7.1 Geometrias de contrações de:

- a) Whitehead;
- b) Morel;
- c) Hussain;
- d) Batchelor-Shaw.

comprimento das contrações $L_C=0,588$ m

dimensão de entrada das contrações $D_E=0,24$ m

dimensão de saída das contrações $D_S=0,12$ m

A localização do ponto de intersecção (x_m) dos dois polinômios no caso da contração de Morel foi determinado pelo correspondente ponto de inflexão da parede do modelo de Whitehead.

Foram atendidas as condições de projeto para que não ocorra a separação do escoamento na contração de Morel, conforme mostrado no item 6.6.1.

Deve-se notar na Figura 7.1 que as contrações de Whitehead e Morel são praticamente semelhantes com exceção das regiões próximas aos pontos de inflexão das paredes, onde a contração de Morel apresenta uma transição mais suave e uma menor curvatura.

Na contração de Batchelor-Shaw o ponto de inflexão ocorre rapidamente na região posterior à entrada, e a contração de Hussain é a que apresenta as menores curvaturas.

7.2 Simulação numérica do escoamento potencial

Um dos grandes problemas para a análise numérica é que o escoamento no interior da contração é, notadamente, tridimensional e altamente turbulento em algumas regiões. Possivelmente existem regiões com recirculação, como por exemplo nas regiões de intersecção das paredes.

Para estudar o problema foi necessária uma simplificação, através da aplicação de métodos de análise numérica bidimensional, sendo escolhido para a análise o plano de

simetria das contrações, com a hipótese de que os cantos não influenciam significativamente no escoamento central.

Para a simulação do escoamento potencial foi escolhido o programa ALGOR, desenvolvido pela *Algor Interactive Systems*, dada a sua praticidade e reconhecida confiabilidade no meio científico e tecnológico.

Para o caso da contração de Whitehead, pode-se obter o campo de velocidades potenciais que foram utilizados no cálculo da geometria da contração através do programa CONTRAC.

7.2.1 O programa ALGOR

O programa ALGOR, é um programa de sistemas de análise numérica desenvolvido para várias áreas da Engenharia, entre elas o sistema de análise de escoamento de fluidos bidimensionais, ALGOR - *Fluid Flow System* [1].

Este sistema resolve as equações de Navier-Stokes para escoamento incompressível viscoso em regime permanente. Não possui nenhuma ferramenta para tratamento de escoamento turbulento, sendo que para a solução dos problemas práticos, que normalmente são turbulentos, deve-se tomar o devido cuidado na interpretação dos resultados.

Através de uma interface CAD (*Computer Aided Design*) pode-se definir as geometrias das superfícies e as correspondentes condições de contorno. Com este programa é possível obter, com facilidade, a visualização gráfica do

campo de velocidades totais, axiais e radiais, campo de pressão, de vorticidade e de vetores de velocidade.

8.2.2 Malha de solução

A malha de solução escolhida para as contrações foi de 36 linhas verticais igualmente espaçadas, e 30 linhas horizontais com controle de espaçamento geométrico de razão 20 (relação entre o maior e o menor espaçamento). Este número de linhas horizontais e razão de espaçamento foram determinados para se obter uma solução mais refinada na região próxima às paredes, de forma que a camada limite fosse melhor caracterizada.

Em todos os modelos analisados a precisão na geração das superfícies foi 10^{-4} m e na geração das malhas foi da ordem de 10^{-5} m, sendo gerados 1080 nós para cada modelo.

A o trecho reto na entrada das contrações de 0,12 m, como pode ser visto nas figuras mostradas a seguir, objetiva a promover uma melhor caracterização do escoamento a montante, e também, como poderá ser visto no arranjo experimental, existe um trecho reto na entrada da contração.

As malhas de solução são apresentadas nas Figuras 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5, e a discussão sobre elas será apresentada no capítulo seguinte.

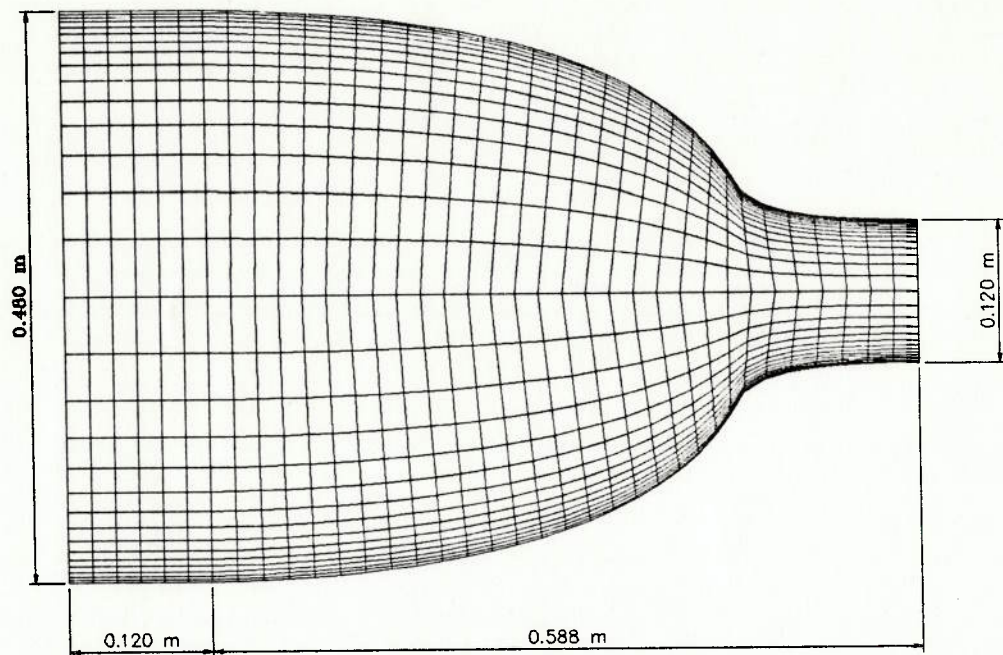


Figura 7.2 Malha de solução para a contração de Whitehead, gerada pelo programa ALGOR

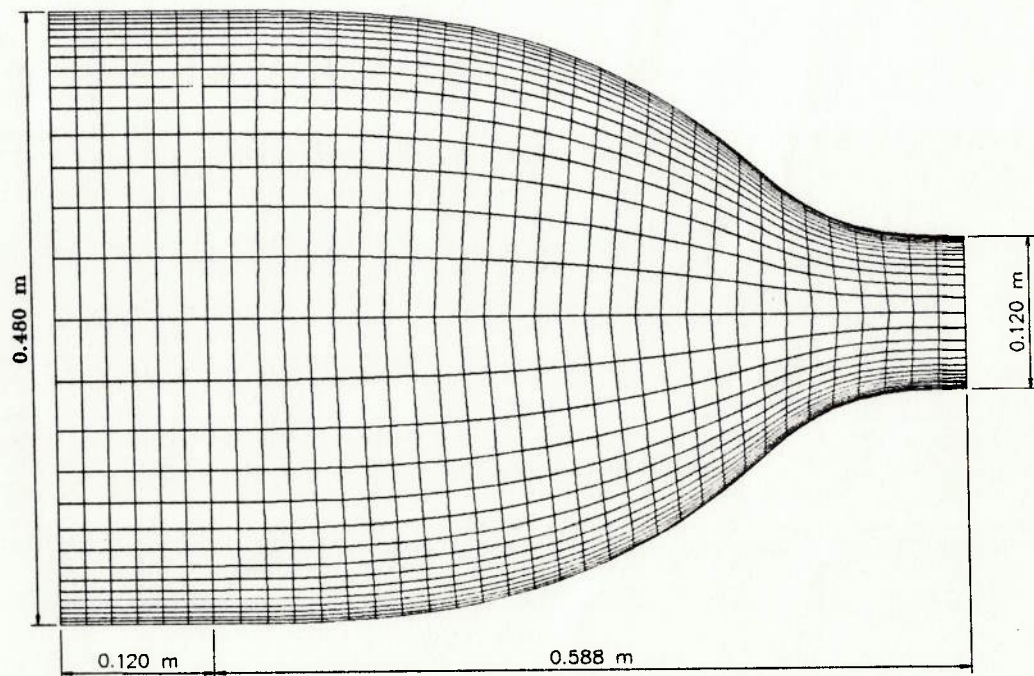


Figura 7.3 Malha de solução para a contração de Morel, gerada pelo programa ALGOR

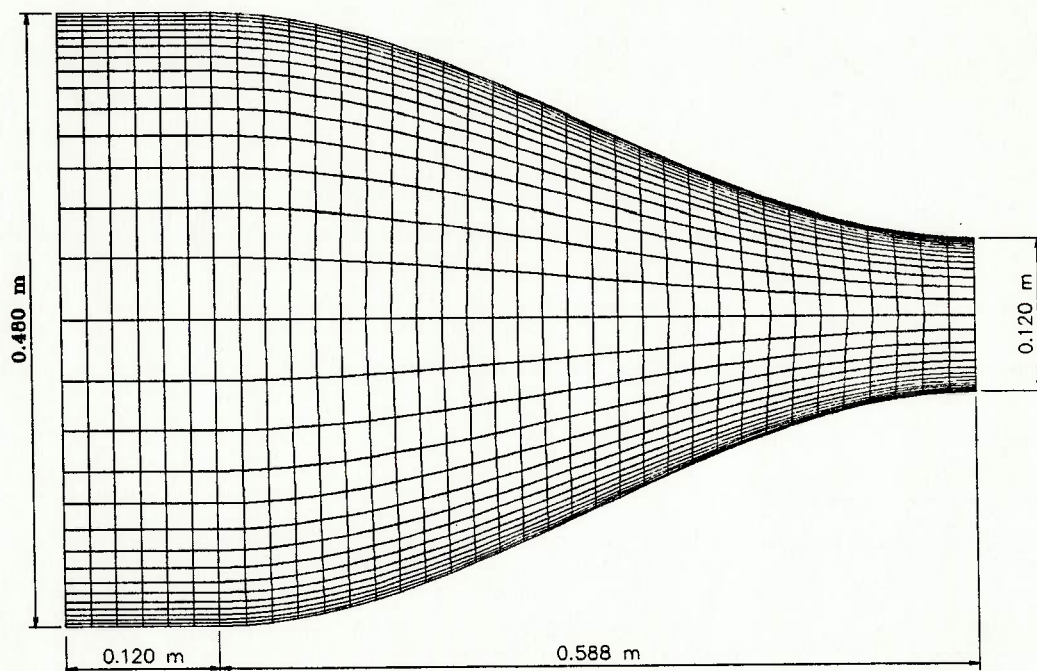


Figura 7.4 Malha de solução para a contração de Hussain, gerada pelo programa ALGOR

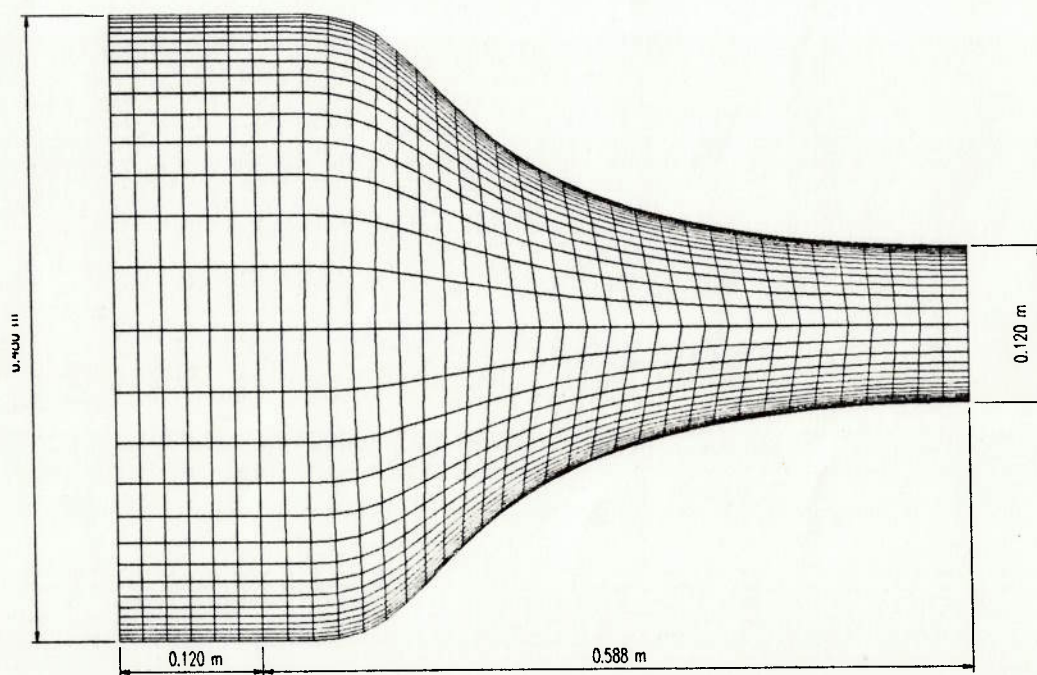


Figura 7.5 Malha de solução para a contração de Batchelor-Shaw, gerada pelo programa ALGOR

7.2.3 Condições de contorno

As condições de contorno na simulação com o programa ALGOR são: perfil de velocidade de entrada constante e unidimensional e velocidade nula nas paredes. Este perfil de velocidade é normalmente verificado nas seções de entrada das contrações de túneis de vento, justificando assim a condição de contorno.

Como objetivo é obter as distribuições de velocidades potenciais e o programa ALGOR leva em conta o termo viscoso da Equação de Navier-Stokes, decidiu-se reduzir a viscosidade dinâmica para valores muito abaixo do valor real, que no caso do ar, à temperatura de 20°C, é de $1,81 \times 10^{-5}$ Pa.s.

Como o programa ALGOR foi desenvolvido para escoamento laminar, havia uma dificuldade de convergência quando se utilizava números de Reynolds elevados. Para contornar esta dificuldade os problemas foram inicialmente resolvidos para uma viscosidade de 10^{-3} , reduzida para 10^{-4} , 10^{-5} e por último a 10^{-6} Pa.s. Não foi possível reduzir a viscosidade para valores abaixo 10^{-6} Pa.s pois as soluções começaram a divergir.

A massa específica foi considerada igual a 1 kg/m^3 , pois o seu exato valor é de importância secundária para as aplicações desta etapa.

Como critério de convergência foi considerada uma precisão de solução 10^{-6} e uma razão incremental de 10^{-6} .

Para se certificar que a distribuição de velocidade próxima à parede possa ser adimensionalizada, as quatro contrações foram testadas para perfis de velocidades de entrada constantes e iguais a 1,25 e 2,5 m/s, resultando em velocidades de saída de 5 e 10 m/s, respectivamente.

7.3 simulação do comportamento da camada limite

O objetivo desta etapa é caracterizar a faixa de velocidade para a qual uma contração pode manter a uniformidade do perfil de velocidade sem ocorrência de descolamento.

As simulações foram conduzidas para as velocidades de entrada na contração de 0,25; 0,5; 1,25; 2,5 e 5 m/s, tendo como saída velocidades de 1; 2; 5; 10 e 20 m/s. Não foram testadas velocidades superiores pois aí o escoamento tenderia a ser mais estável.

Para esta análise numérica foi utilizado o programa STAN7A, descrito a seguir.

7.3.1 O programa STAN7A

Este programa foi desenvolvido por Crawford e Kays da Universidade de Stanford para microcomputadores da linha IBM-PC, e foi adaptado da versão STAN5 [13] para computadores de grande porte.

Trata-se de um programa de diferenças finitas que resolve as equações de energia e de momento da quantidade de movimento da camada limite para escoamentos laminar e turbulento compressíveis, sobre ou dentro de corpos de revolução sem recirculação. Não trata escoamentos em dutos, e é restrito à camada limite de pequena espessura, quando comparado ao raio do corpo de revolução. Entretanto, pode ser utilizado para corpos planos, simplesmente ajustando o raio de revolução constante. Pode-se optar pela solução das duas equações de energia e momento, ou no caso de escoamento adiabático e incompressível, somente pela equação de momento. Para a solução da camada limite turbulenta o programa STAN7A utiliza o modelo de comprimento de mistura ou modelo k- ϵ da turbulência.

As condições de contorno devem ser:

- . o número de estações e as respectivas posições ao longo da superfície;
- . as velocidades fora da camada limite, que no caso são as distribuições de velocidades obtidas com o programa ALGOR;
- . o raio do corpo de revolução (para os casos estudados será constante e igual a 100);
- . as curvaturas das superfícies;
- . perfil de velocidade inicial;
- . o número de Reynolds de transição;
- . a massa específica;
- . a viscosidade dinâmica;
- . o coeficiente de atrito da superfície;

- o incremento para avanço da solução (é uma fração da espessura da camada limite);
- o número de tubos de corrente dentro da camada limite (variando de 35 a 50).

Como resultado é possível obter os parâmetros apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 Parâmetros gerados pelo programa STAN7A

XU	estação de trabalho
CF2	coeficiente de atrito na parede, $C_f/2$
ST	número de Stanton
RM	número de Reynolds relativo a espessura da quantidade de movimento
RK	número de Reynolds relativo a rugosidade
UGU	velocidade do escoamento fora da camada limite
H	fator de forma δ^*/δ_2
CUR	curvatura da superfície na direção axial
PPL	parâmetro do gradiente de pressão nas coordenadas das paredes (P^+)
YL	distância do ponto onde U é 99% da velocidade central, $d_{99\%}$
ALMG	constante do comprimento de mistura da região externa, lambda
N	número de linhas de corrente (tubos) na direção do escoamento
ENTRAIN	taxa de absorção de fluido na camada limite
RHO(2)	densidade do fluido na superfície
RHO(NP2)	densidade do fluido no turbilhão mais externo
VISCO(2)	viscosidade do fluido na superfície
VISCO(NP2)	viscosidade do fluido no turbilhão mais externo

A aplicação do programa STAN7A não é direta, necessitando como condição de contorno o campo de velocidade ou de pressão junto à parede da contração. Se fosse admitido escoamento puramente unidimensional, ou seja, variando conforme a relação de áreas, os gradientes de pressão, devido às curvaturas das paredes, não seriam considerados na análise da camada limite.

5.3.2 Malha de solução e condições de contorno

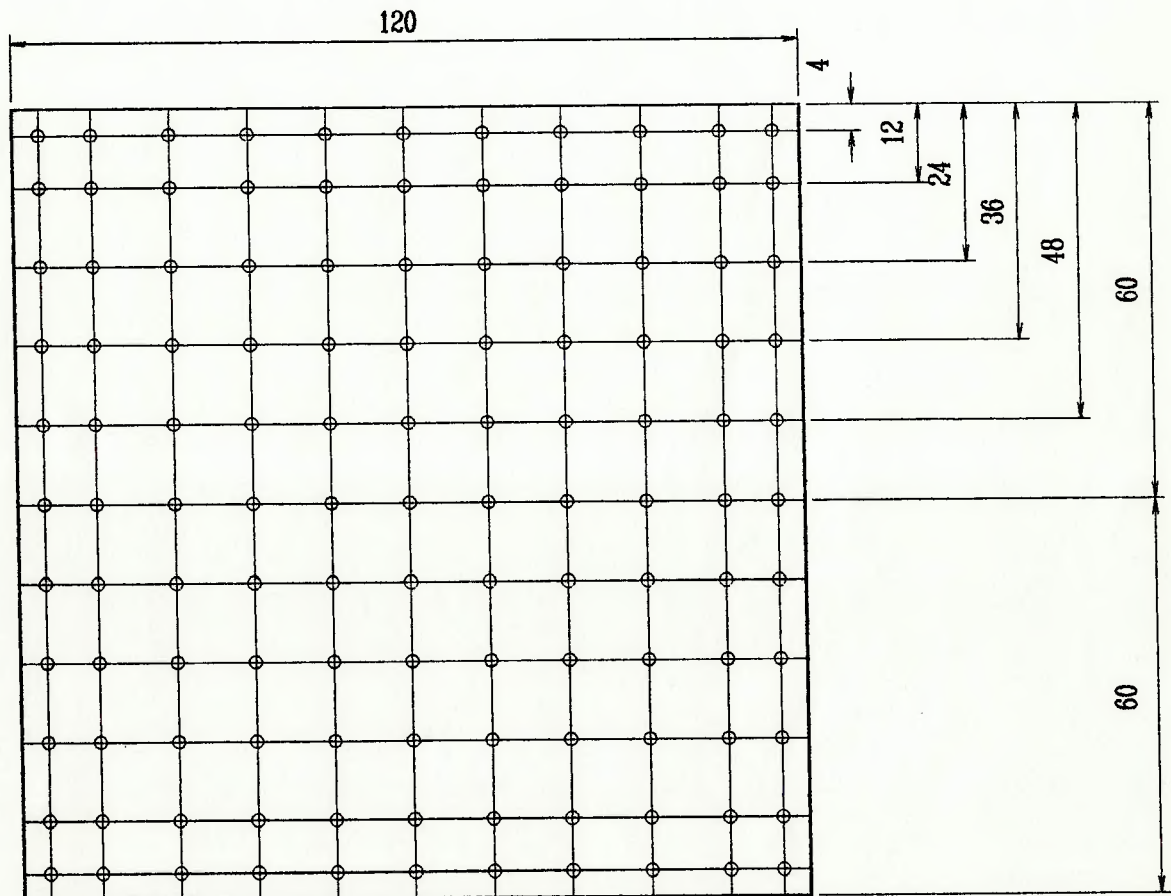
De posse das distribuições das velocidades adimensionais próximas às paredes das contrações, obtidas com o programa ALGOR, foi possível a simulação do comportamento da camada limite para várias velocidades de entrada nas quatro contrações.

Foram selecionados 38 pontos sobre as superfícies das contrações, espaçados de forma a se concentrarem nas regiões de maior curvatura, para que a camada limite fosse melhor caracterizada. A massa específica foi considerada constante e igual a $1,2 \text{ kg/m}^3$, a viscosidade dinâmica igual a $1,81 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$ e a rugosidade superficial foi considerada igual a zero pois, como o modelo experimental foi contruído em PVC, a sua rugosidade superficial é efetivamente muito baixa.

7.4 Metodologia experimental

7.4.1 Medição do perfil de velocidade

Para medição do perfil de velocidade na saída da contração foi utilizado um tubo de Pitot estático que foi posicionado seguindo a distribuição apresentada na Figura 7.6, e a pressão dinâmica medida por um manômetro de precisão a quartzo Mensor.



medidas em mm

Figura 7.6 Detalhe do mapeamento da saída da contração com o tubo de Pitot

Como foi utilizado um tubo de Pitot de diâmetro de 3 mm, não foi possível realizar medições do perfil de velocidade

muito próximas à parede. Procurou-se medir a velocidade em toda a seção porque não era possível garantir que o escoamento fosse simétrico. O tubo de Pitot foi posicionado a uma distância de 5 mm do plano de saída da contração, por um dispositivo de coordenadas X-Y (mostrada nas fotos 1 e 2 do Anexo C), com curso total de coordenada de 250 mm e resolução de 0,05 mm.

Foram realizadas duas séries de medições para uma velocidade de 8 m/s totalizando para cada série 121 pontos de medição. Posteriormente foram medidos os perfis para velocidades de 3; 5; 10 e 20 m/s no eixo de simetria da seção transversal da saída da contração.

Foram medidas as temperaturas do ar na saída da contração, de bulbos seco e úmido e a pressão atmosférica, para a determinação da massa específica do ar.

7.4.2 Medição da intensidade de turbulência na saída da contração

Para a medição da intensidade de turbulência foi utilizado uma sonda de anemômetro de fio quente calibrado denominada AD-51 com 5 μ m de diâmetro e fabricado pela DANTEC, conforme pode ser visto nas fotos 3 e 4 do Anexo C.

A equação de resposta do anemômetro de fio quente é dada pela equação 7.1, cujo ensaio de calibração é apresentado no Anexo D, e a intensidade de turbulência é calculada pela

equação 7.2. Estas equações foram recomendadas por Wills [34] e Bearman [3].

$$E^2 = A + BU^{1/n} \quad (7.1)$$

$$\frac{\sqrt{u^2}}{U} = 2n \frac{E e_{rms}}{E^2 - A} \quad (7.2)$$

onde:

E é o valor rms da tensão medida na ponte do fio quente;

e_{rms} é o valor rms da relação $(E' - E)$;

E' é valor instantâneo da tensão na ponto do fio quente;

A constante da curva de calibração;

B coeficiente angular da curva de calibração;

U é o valor da velocidade medida com o fio quente;

$\frac{\sqrt{u^2}}{U}$ é a intensidade de turbulência.

A sonda foi posicionada no interior da contração a uma distância de 5 mm da saída, para que o sinal de turbulência não fosse afetado pela borda da saída (ver detalhe na foto 5 do Anexo B).

Foram medidos 19 pontos no eixo de simetria horizontal da seção transversal da saída da contração, posicionados a uma distância de 0,5; 1; 2; 4; 12; 24; 36; 48; 60; 72; 96; 108; 110; 114; 117 e 117,5 mm, da parede de referência. Para o posicionamento da sonda foi utilizado o mesmo dispositivo de coordenadas do ensaio de perfil de velocidade.

Foram realizadas medições para velocidades médias na saída da contração de 2,5 e 10 m/s, medidos com tubo de Pitot "de testemunha" e um manômetro eletrônico Airflow.

As intensidades turbulentas, relacionadas pela flutuação de tensão do anemômetro de fio quente, foram medidas pelo analisador de espectros, sendo calculados internamente os respectivos valores *rms*.

A velocidade média, relacionada ao valor *rms* da tensão do fio quente, foi obtida com o analisador de espectros e verificado com um multímetro digital.

Foi também verificada, através da análise espectral do sinal proveniente do fio quente, a existência de flutuações de velocidades características da perturbação do escoamento provocadas pelas pás do ventilador e por vibrações mecânicas e acústicas.

Não foi possível medir as intensidades turbulentas das componentes de velocidades transversais do escoamento pois não se dispunha da sonda de fio quente específica para este caso.

7.4.3 Medição da intensidade de turbulência longitudinal

Para a medição da intensidade de turbulência foi utilizado o mesmo anemômetro de fio quente citado anteriormente. Foram medidos 16 pontos no interior da contração sobre o eixo de simetria longitudinal posicionados a uma distância de 5; 30; 60; 90; 120; 150; 180; 210; 240; 270; 300; 330;

360; 390; 420; 450 e 480 mm, em relação à seção de saída. Para o posicionamento da sonda foi utilizado o mesmo dispositivo de coordenadas do ensaio de perfil de velocidade, porém com dispositivo prolongador de comprimento de 400 mm, conforme mostrado na foto 6 do Anexo C.

Foram realizadas medições para velocidades médias de 2,5 e 10 m/s na saída da contração.

7.4.4 Aparato experimental

Para os ensaios da contração foi utilizada uma câmara de seção quadrada de 0,48 m de lado (ver foto 5 do Anexo C), construída em chapa metálica e internamente com 4 placas perfuradas para eliminar fluxos preferenciais.

Esta câmara é utilizada para ensaios de ventiladores no Laboratório de Vazão do IPT, e foi adaptada especialmente para este experimento.

Foram instaladas uma colméia na seção posterior à saída do ventilador, uma tela de aço inox e uma outra colméia na seção anterior à contração, conforme pode ser visto na Figura 7.7, mostrada a seguir.

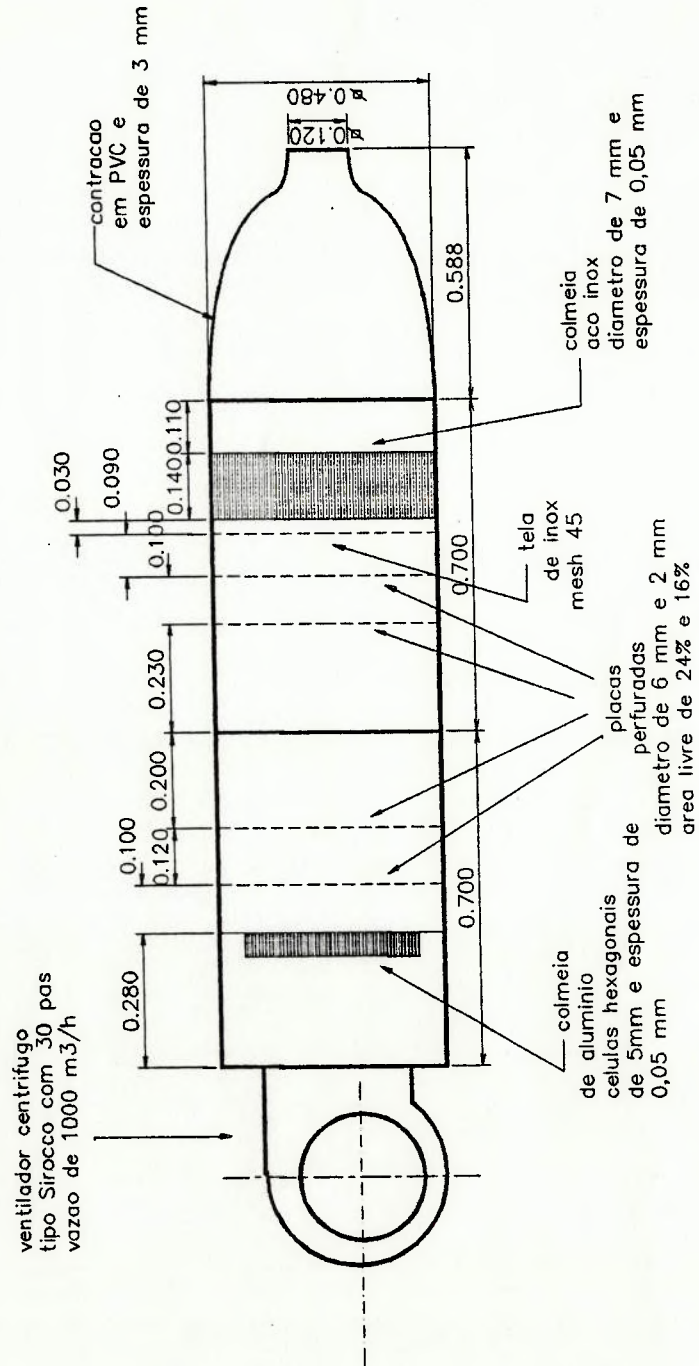


Figura 7.7 Detalhe da câmara de ensaio

7.4.5 Descrição da instrumentação

.Analisador de espectro

marca: Yokogawa

modelo: 3655E

faixa de tensão: 60, 200 e 600 mV ; 2, 6, 20, 60 V AC/DC

banda de frequência: sinal DC até 20 kHz (-3 dB)

sinal AC 1 Hz até 20 kHz (-3dB)

amostragem: 512 pontos

exatidão: $\pm 0,25 \%$

resolução de frequência: 1/200 da faixa de frequência

frequência de amostragem: 2,56 vezes a faixa de frequência

memória: 8 kbytes

.módulo FFT

modelo: 3659 20A

funções: espectro linear, potência, densidade de potência,
rms, cruzado, função de transferência e função
coerência.

. termômetro de resistência tipo Pt 100 Ω marca Ganz,

rastreado ao Laboratório de Termometria do IPT.

resolução: 0,1 $^{\circ}\text{C}$

. manômetro a quartzo Mensor rastreado ao Laboratório de Metrologia do IPT.

modelo:10100

faixa: 0 a 10 kPa

resolução: 0,03 Pa

- . manômetro eletrônico Airflow rastreado ao Laboratório de Metrologia do IPT.

modelo:EDM2500

faixa: 0 a 2500 Pa

resolução: variável

- . voltímetro digital Goldstar rastreado ao Laboratório de Medidas Elétricas do IPT.

modelo:FC7051

resolução: 0,001 V DC

- . barômetro de coluna de mercúrio F. DARTON

resolução:0,05 mmHg

- . psicrômetro Gasella

resolução: 0,25 °C

- . tubo de Pitot estático de diâmetro de 3 mm

- . anemômetro de fio quente DISA-DANTEC AD-51

tipo: temperatura constante

sonda:55P15

ponte:55M10

fonte:55M05

- . conjunto calibrador de sonda de anemômetro DISA

modelo:55D45

faixa de velocidade: 2 m/s a Mach 1

8 RESULTADOS

8.1 Resultados da simulação numérica do escoamento potencial

O objetivo das simulações numéricas do escoamento potencial foi de se obter as distribuições de velocidades adimensionalizadas próximas às paredes das contrações de Whitehead, Morel, Hussain e Batchelor-Shaw, e também verificar a uniformidade dos perfis de velocidades nas seções das contrações.

Estas contrações foram testadas com o programa ALGOR para velocidades de entrada de 1,25 e 2,5 m/s e viscosidade de 10^{-6} Pa.s, produzindo na saída velocidades de 5 e 10 m/s e números de Reynolds de 6×10^5 e $1,2 \times 10^6$, em relação à dimensão de saída da contração.

Nestas condições as linhas de iso-velocidades e as distribuições de velocidades adimensionais próximas à parede de cada contração foram idênticas.

Este fato comprova que, apesar do programa ALGOR tratar problemas viscosos, a condição de baixa viscosidade garantiu, aproximadamente, que os escoamentos no interior das contrações podem ser considerados como potenciais.

8.1.1 As linhas de iso-velocidades

Apesar de serem soluções aproximadas do escoamento real, as linhas de iso-velocidades podem ser utilizadas para uma avaliação inicial das diferenças de comportamentos e uniformidades dos escoamentos nos interiores das contrações.

Assim, as linhas de iso-velocidades podem ser vistas nas Figuras 8.1 a 8.4, onde foram selecionadas 50 linhas para representarem as magnitudes de velocidades de 1,25 a 5 m/s ou de 2,5 a 10 m/s.

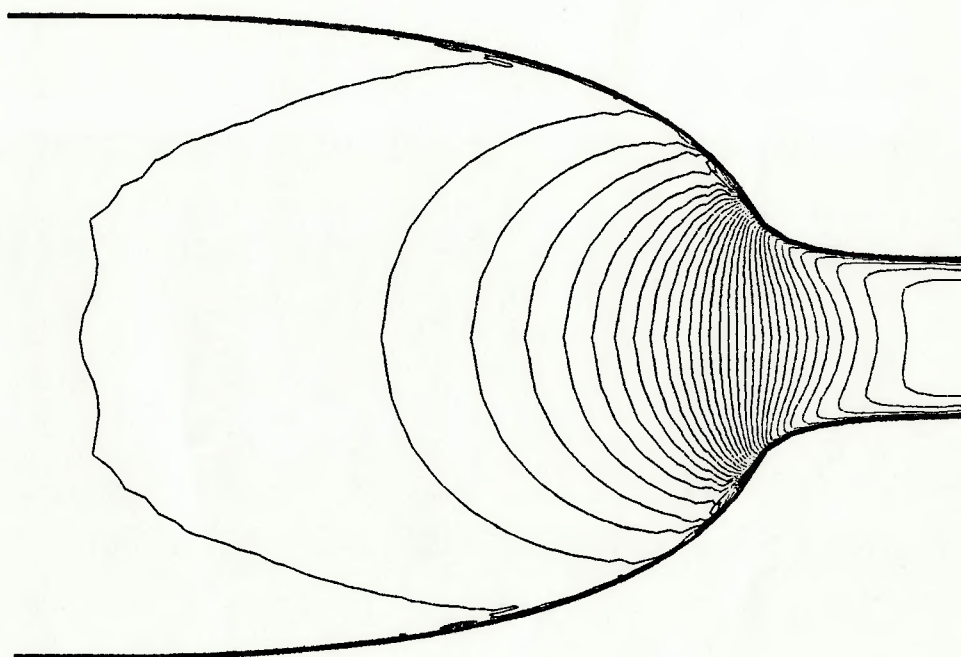


Figura 8. 1 Linhas de iso-velocidades para a contração de Whitehead, gerados pelo programa ALGOR

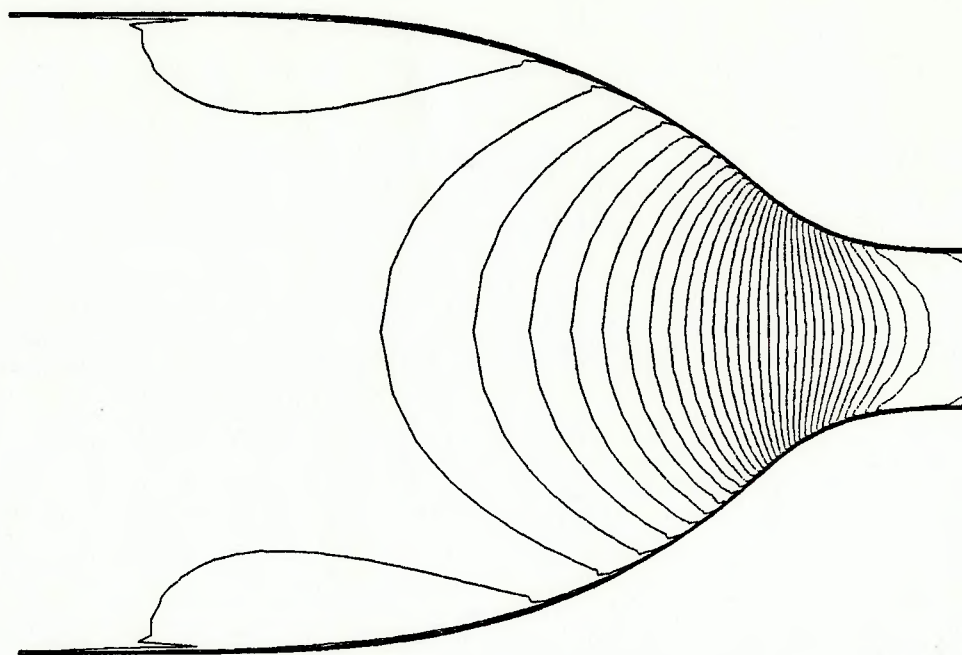


Figura 8.2 Linhas de iso-velocidades para a contração de Morel, gerados pelo programa ALGOR

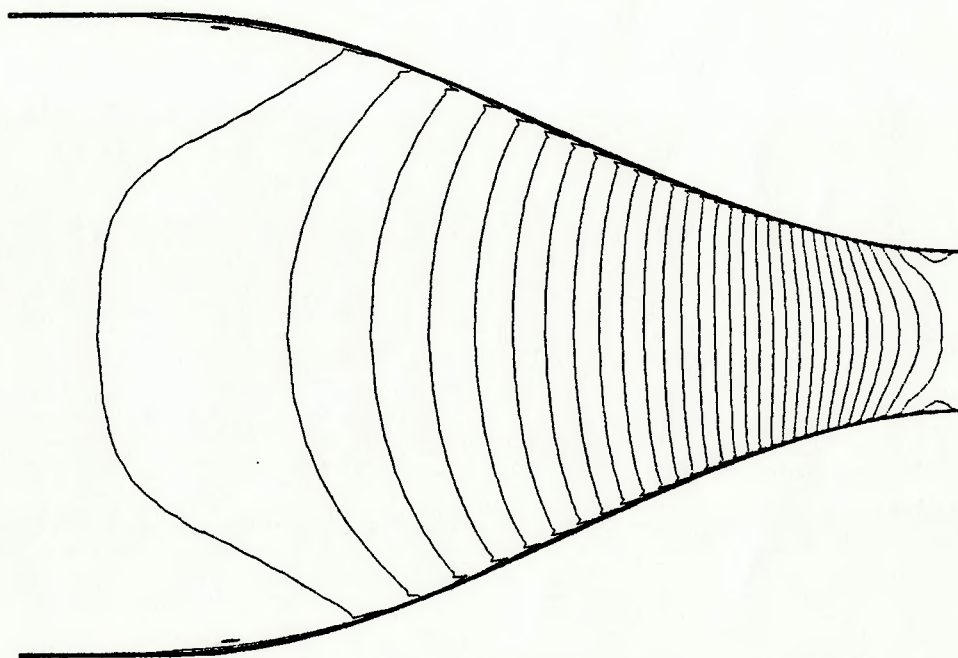


Figura 8.3 Linhas de iso-velocidades para a contração de Hussain, gerados pelo programa ALGOR

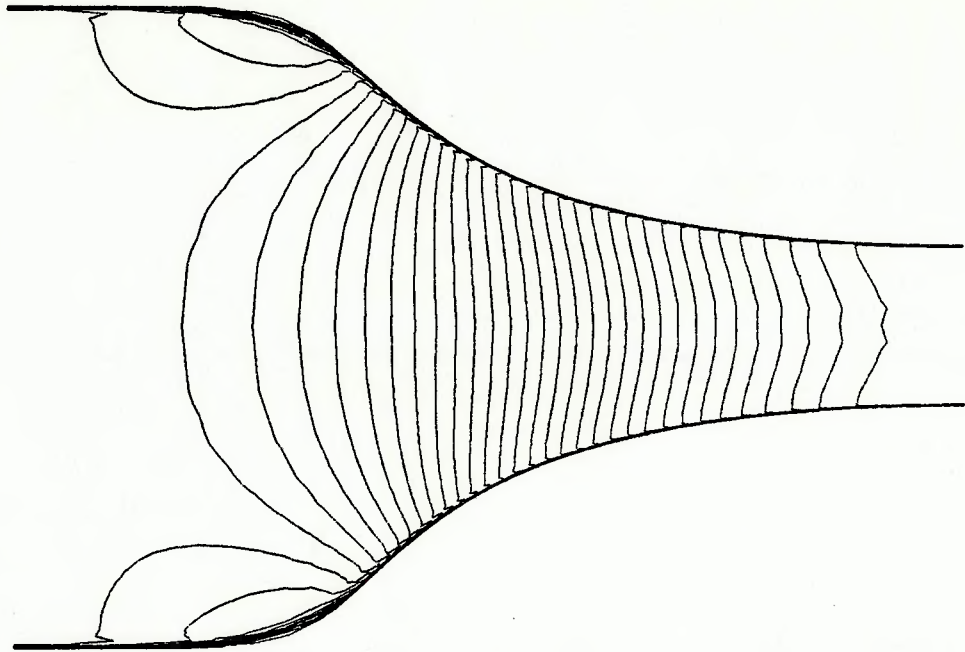


Figura 8.4 Linhas de iso-velocidades para a contração de Batchelor-Shaw, gerados pelo programa ALGOR

Pela observação da forma das linhas de iso-velocidades indicadas nas Figuras 8.1 a 8.4, pode-se notar visualmente que as acelerações dos escoamentos ocorrem mais acentuadamente nas regiões próximas ao eixo de simetria. Nestas regiões as linhas de iso-velocidades possuem uma forma convexa, e à medida que os escoamentos se aproximam das regiões dos pontos de inflexão das paredes as linhas se tornam retas, indicando que o escoamento está sendo acelerado uniformemente em todas as regiões.

Após os pontos de inflexão, pode-se notar que as linhas de iso-velocidades possuem uma forma côncava, mostrando que as maiores acelerações ocorrem nas regiões próximas às paredes.

Em relação às saídas das quatro contrações, as linhas de iso-velocidades apresentam formas distintas:

- contração de Whitehead: as linhas de iso-velocidades tendem a retornar às formas planas, mas evidenciando a formação de uma camada limite;
- contração de Morel: as linhas de iso-velocidades se tornam cada vez mais côncavas;
- contração de Hussain: a mesma característica da contração de Morel;
- contração de Batchelor-Shaw: as linhas de iso-velocidades possuem uma forma côncava com indicação de distorção na linha de centro.

A conclusão que pode ser tirada dessa análise é que a aceleração do escoamento é influenciada pelas curvaturas positivas (côncavas) e negativas (convexas) das paredes das contrações, e as mudanças das curvaturas das iso-velocidades, de negativa para positiva, ocorrem nos pontos de inflexão.

Nos casos das contrações de Morel e Batchelor-Shaw pode-se notar nas entradas a formação de "bolsões" onde o escoamento não é acelerado. Este fato poderá ser melhor entendido no item 8.1.2.

Objetivando uma melhor entendimento dos comportamentos dos escoamentos nas contrações são apresentadas nas Figuras 8.5 a 8.8 os vetores velocidade nas entradas e saídas.

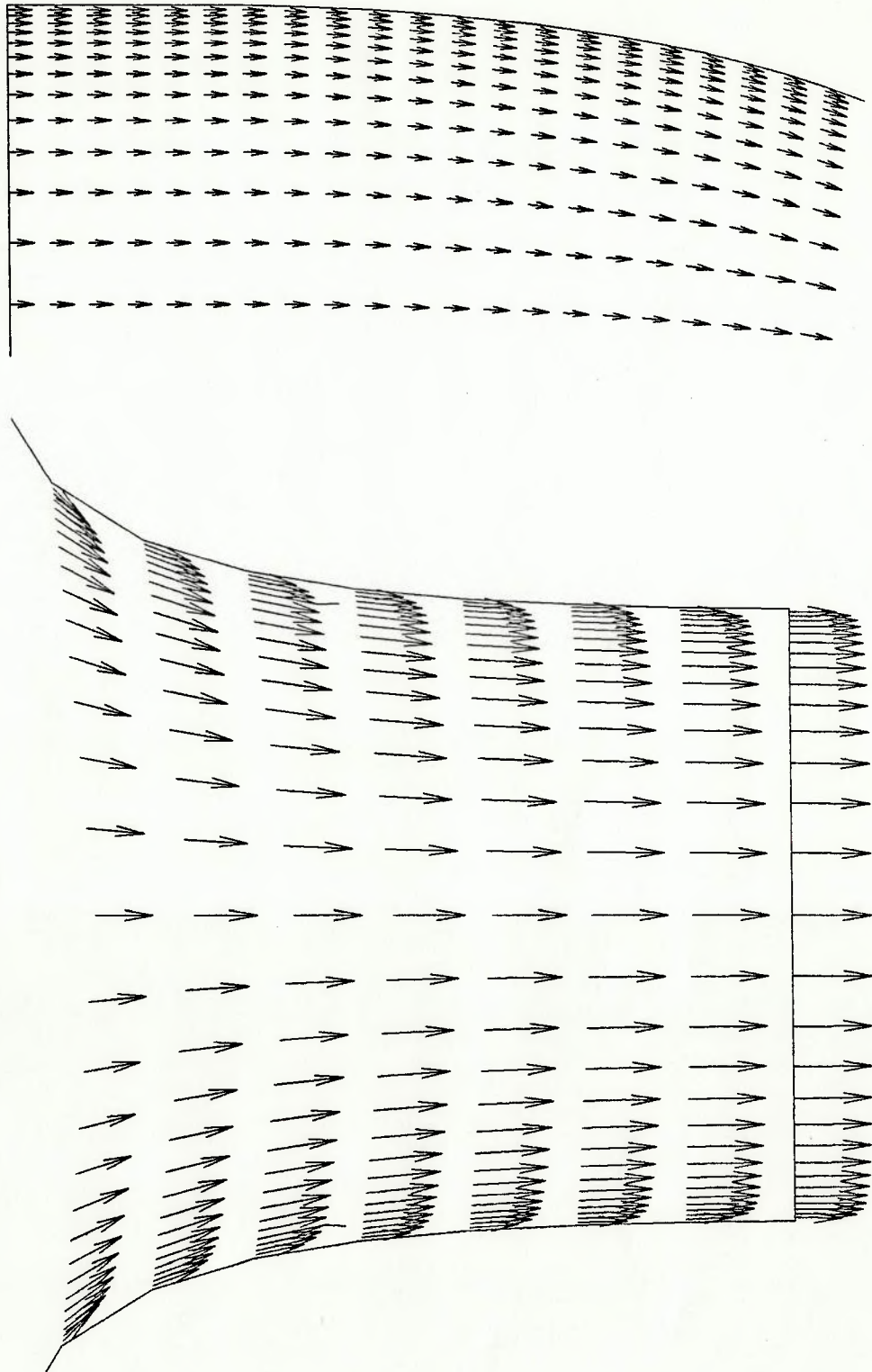


Figura 8.5 Vetores de velocidade na entrada e saída da contração de Whitehead, gerados pelo programa ALGOR

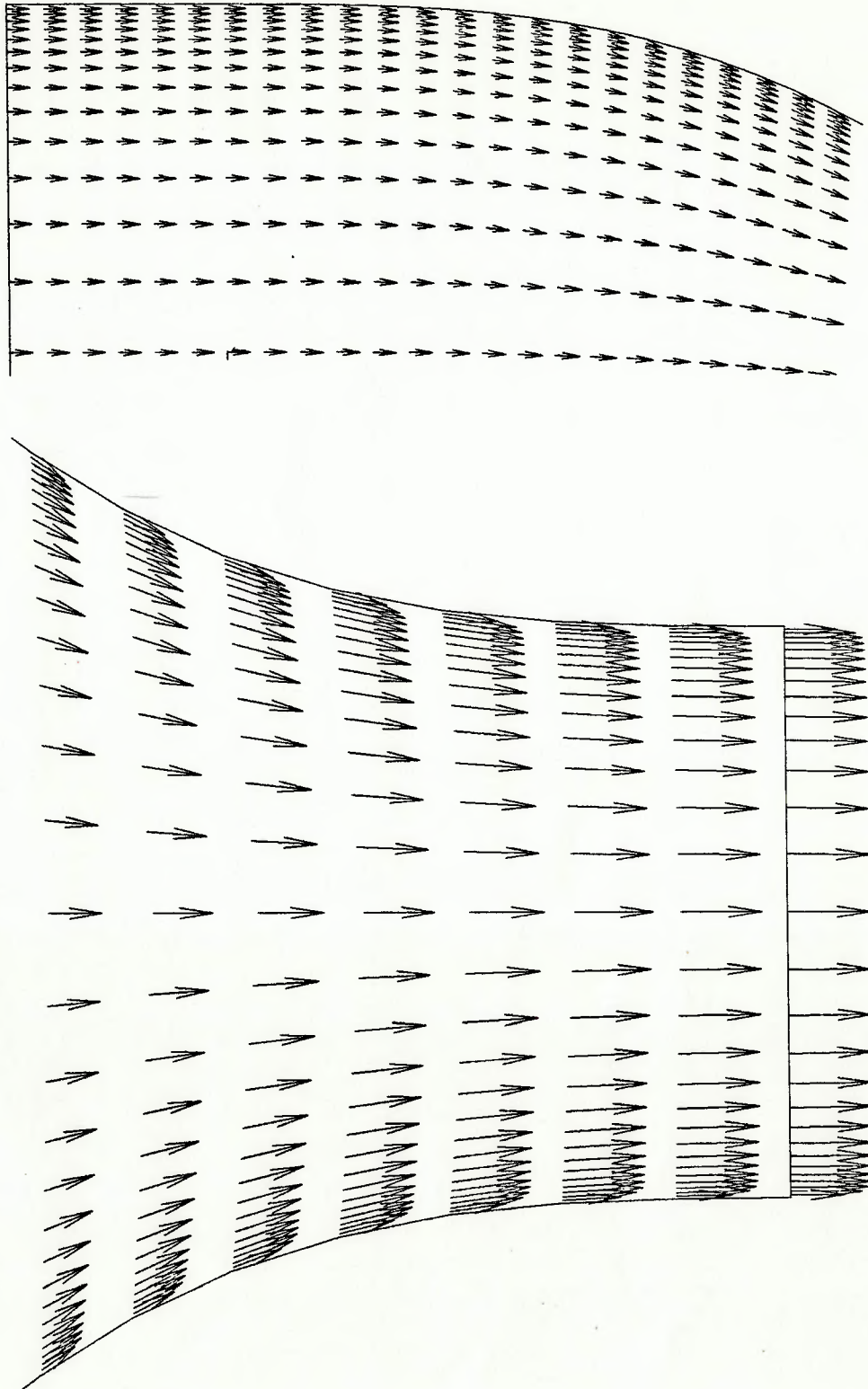


Figura 8.6 Vetores de velocidade na entrada e saída da contração de Morel, gerados pelo programa ALGOR

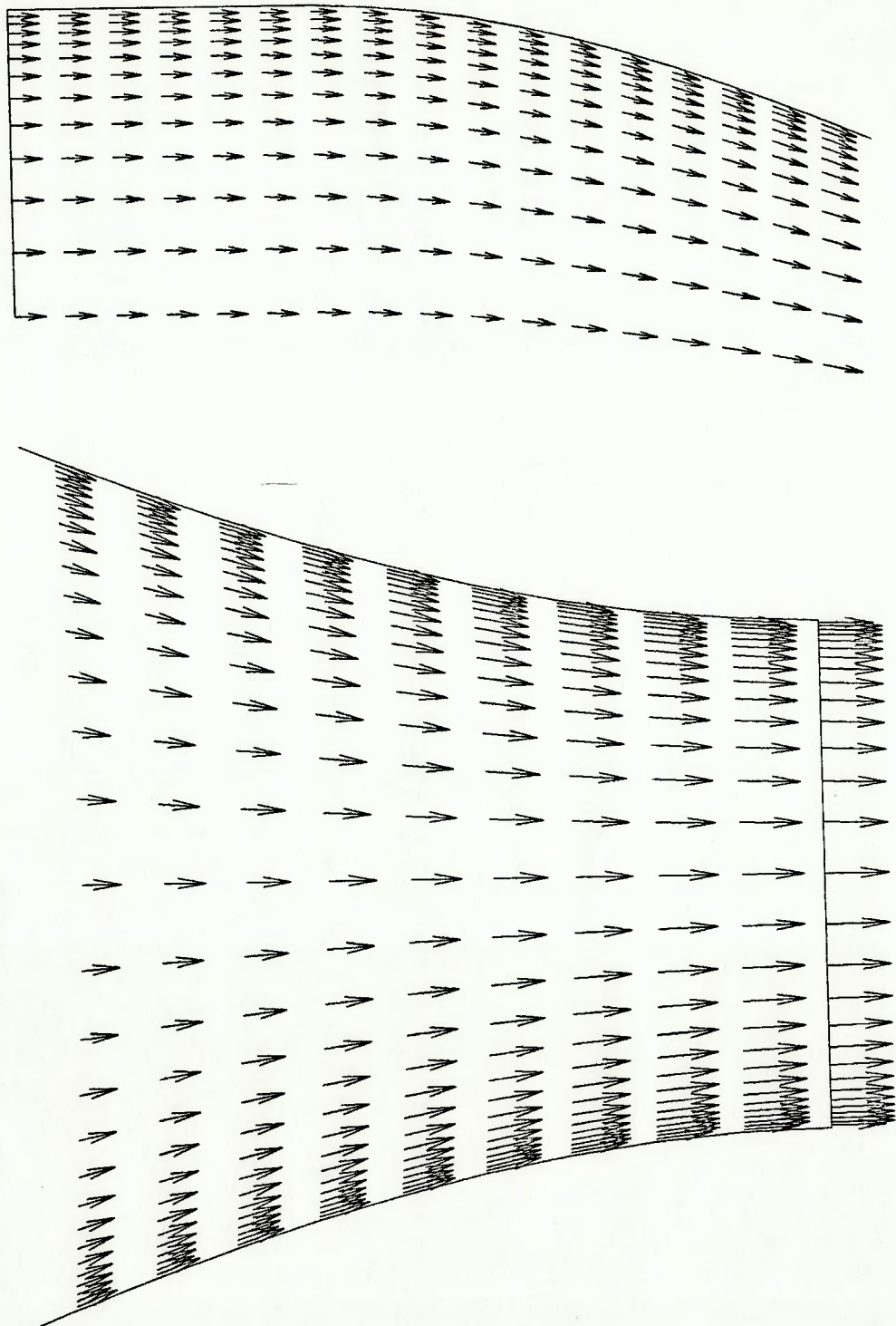


Figura 8.7 Vetores de velocidade na entrada e saída da contração de Hussain, gerados pelo programa ALGOR

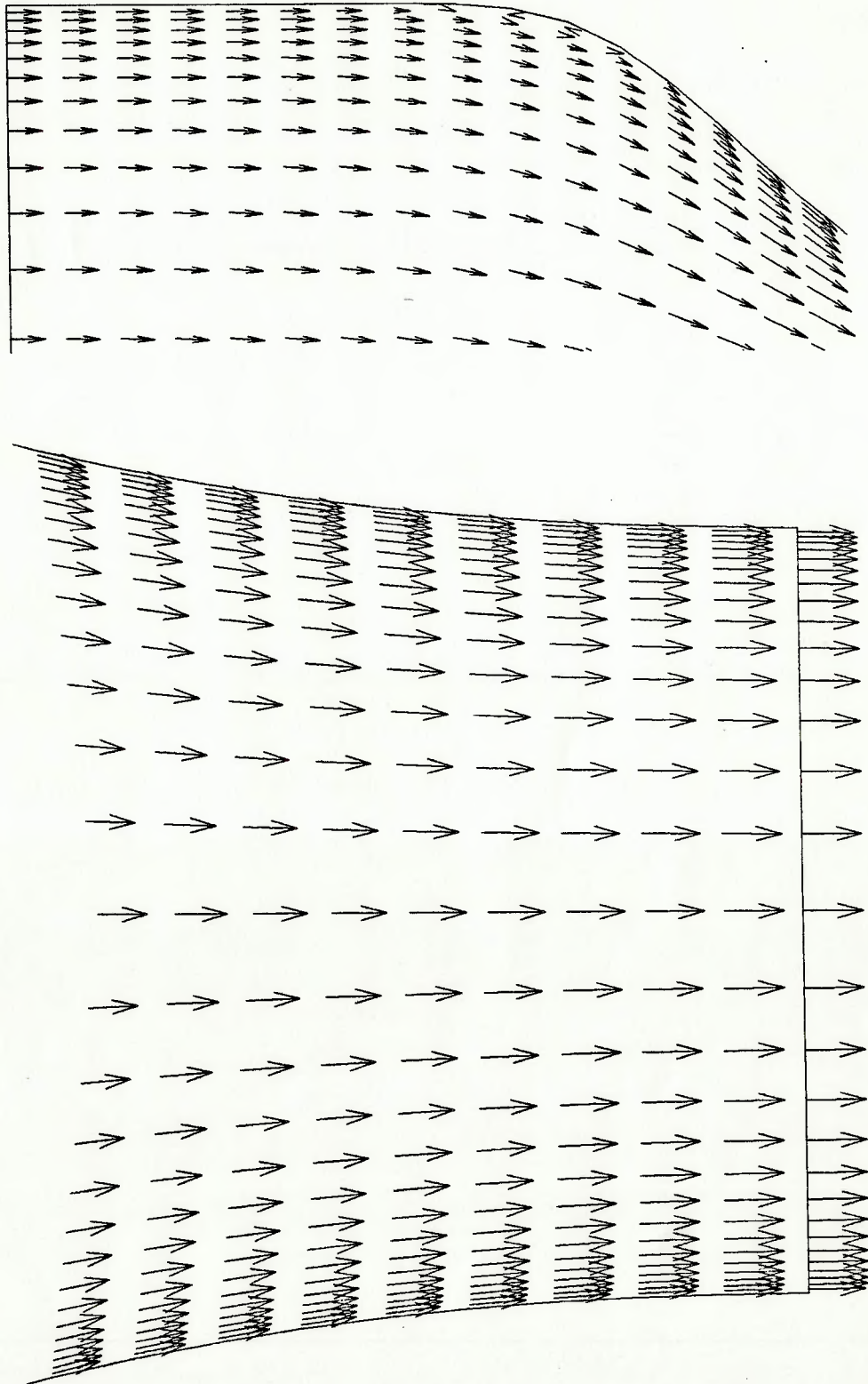


Figura 8.8 Vetores de velocidade na entrada e saída da contração de Batchelor-Shaw, gerados pelo programa ALGOR

Como se pode observar na entrada da contração de Whitehead (Figura 8.5), os vetores velocidades se desenvolvem de forma semelhante ao contorno da contração, e a montante da saída, eles estão afetados por uma falha da geração da malha caracterizada pela existência de um "canto", indicando grande probabilidade de "mistura" das linhas de corrente.

É importante notar também na saída a caracterização de um perfil de velocidade curvo e a caracterização de uma camada limite na parede.

Para este caso, a geração da malha deveria ser melhor detalhada na região do ponto de inflexão, diminuído-se os espaçamentos, mas como poderá ser visto no item 8.1.2, não foi necessário desenvolver outra malha de solução para a obtenção da distribuição de velocidade.

Na contração de Morel (Figura 8.6) os vetores velocidade se desenvolvem de forma mais harmoniosa, porém, com uma pequena tendência de curvatura do perfil de velocidade na saída da contração.

Já na contração de Hussain (Figura 8.7), pode-se observar, nas proximidades da saída, vetores velocidade na parede com módulos superiores aos vetores adjacentes e diminuindo ao se aproximar da saída.

Na contração de Batchelor-Shaw (Figura 8.8) pode-se observar a formação de uma recirculação na região de máxima curvatura da entrada da contração. Este comportamento do escoamento não poderia ser detectado se o problema fosse puramente potencial. E mesmo trabalhando com uma

viscosidade baixa, a existência da recirculação indica a separação do escoamento nesta região.

O programa ALGOR não possui uma ferramenta para a ortogonalização da malha de solução, como pode ser visto nas Figuras 7.2 a 7.5. Dessa forma, a apresentação dos vetores velocidades podem induzir a interpretação de uma distorção das soluções, devido a inclinação das linhas verticais da malha de solução, conforme pode ser visto nas Figuras 8.5 a 8.8, sendo este fato mais evidente nas regiões onde as curvaturas das paredes são convexas e nas linhas de centro.

8.1.2 Distribuição de velocidades próxima à parede

As distribuições de velocidades foram adimensionalizadas em função da velocidade de entrada da contração U_e nas regiões próximas às paredes e nas linhas de centro.

Entretanto, como o programa ALGOR resolve o problema de escoamento viscoso, a existência da parede sólida gera a formação de uma camada limite para o caso da contração de Whitehead, como pôde ser verificado no item anterior.

Como a viscosidade é relativamente baixa, pode-se admitir que numa região próxima à parede o escoamento é ainda aproximadamente potencial.

Assim, foi escolhida a 6ª linha longitudinal das malhas (Figura 7.2), contada à partir da parede superior, como a

região representativa das velocidades potenciais na parede da contração.

Para se verificar a validade desta hipótese, as velocidades adimensionalizadas da 6ª, 7ª, 8ª e 10ª linhas, na contração de Whitehead, foram comparadas às velocidades calculadas pelo programa CONTRAC, conforme pode ser verificado na Figura 8.9.

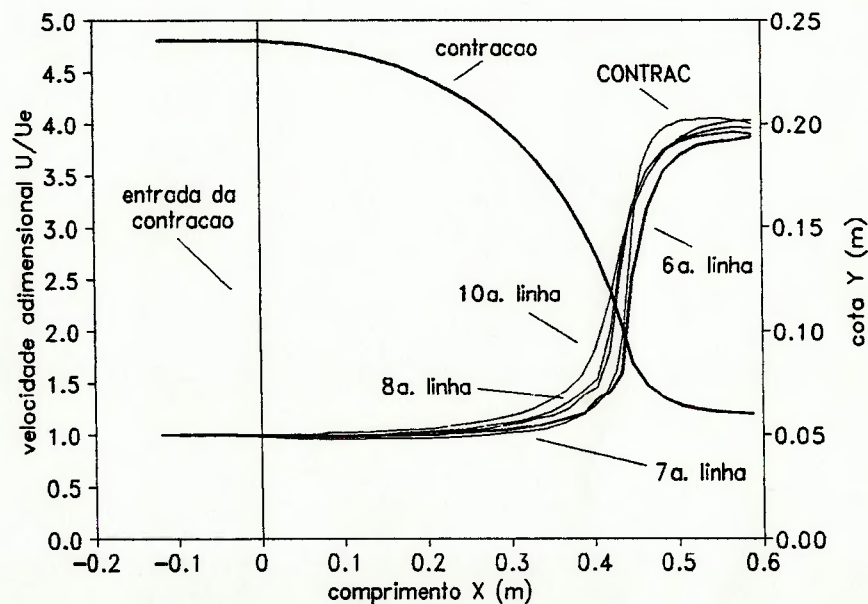


Figura 8.9 Velocidades adimensionalizadas para a contração de Whitehead, baseada no programa ALGOR e CONTRAC.

Pela análise da figura acima, pode-se notar que não somente a 6ª linha horizontal poderia ser utilizada para representar as velocidades do campo potencial, o que mostra que o programa CONTRAC foi bem desenvolvido.

As soluções geradas para estas geometrias podem ser perfeitamente utilizadas na quantificação da velocidade do escoamento nas paredes, e será utilizada como referência as 6ª linhas longitudinais das malhas contadas à partir das paredes superiores (Figuras 8.10 a 8.12).

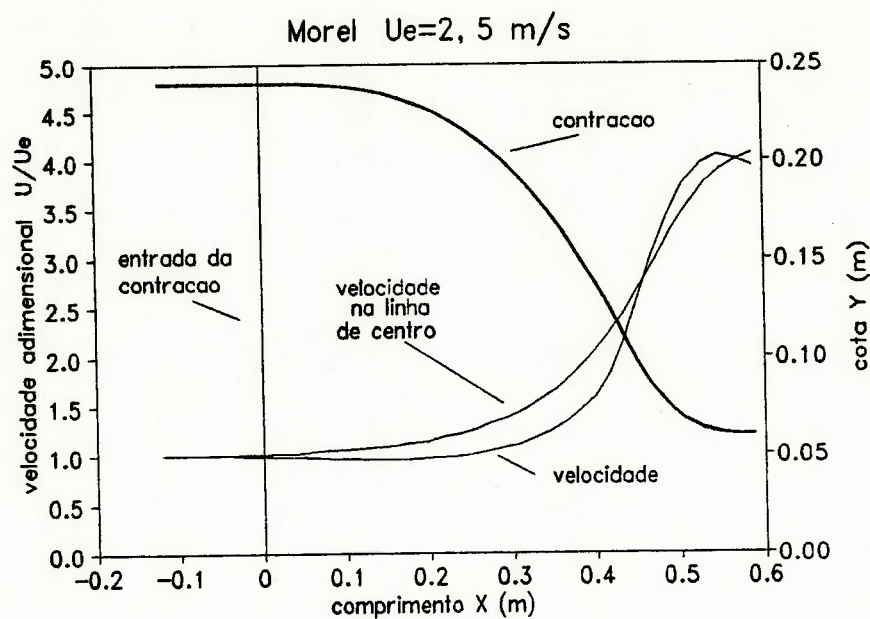


Figura 8.10 Velocidades adimensionais na região próxima à parede e na linha de centro obtidas para a contração de Morel

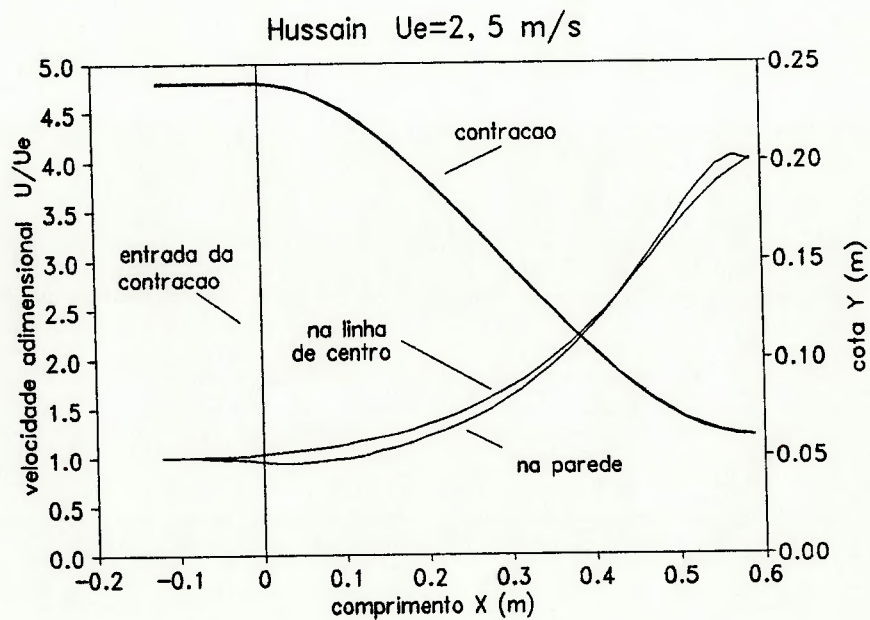


Figura 8.11 Velocidades adimensionais na região próxima à parede e na linha de centro obtidas para a contração de Hussain

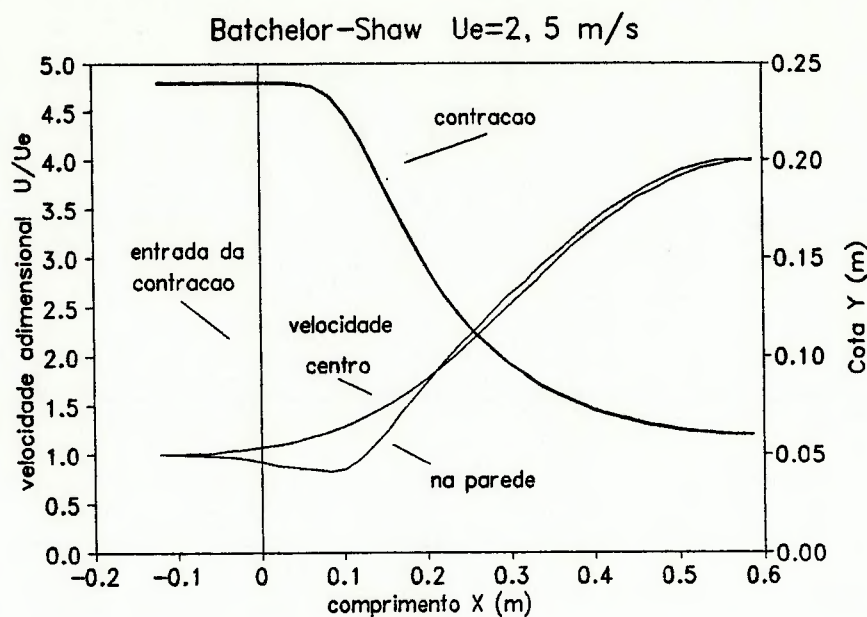


Figura 8.12 Velocidades adimensionais na região próxima à parede e na linha de centro obtidas para a contração de Batchelor-Shaw

Analisando-se as distribuições de velocidades na contração de Morel através da Figura 8.10, verifica-se que entre a entrada e a região central da contração o escoamento tem uma menor aceleração nas proximidades da parede, e a partir do ponto de inflexão, as situações se invertem, até se igualarem na saída da contração, como foi mostrado no item anterior através da análise das linhas de iso-velocidades. O mesmo fato se observa nas contrações de Hussain e Batchelor-Shaw, porém em menor intensidade, como pode ser visto nas Figuras 8.11 e 8.12.

As diferenças das velocidades nas saídas das contrações de Morel e Hussain podem ser explicadas pelos elevados gradientes de velocidades que ocorrem nas proximidades das paredes, provocando a formação de gradientes favoráveis (negativos) de pressão.

Pode-se, entretanto, pelas análises das linhas de iso-velocidades e das distribuições de velocidades próximas às paredes, verificar a existência dos gradientes adversos de pressão na entrada das contrações de Morel, Hussain e, mais acentuadamente, na de Batchelor-Shaw.

Com certeza, melhores soluções poderiam ser obtidas com um maior número de linhas e um melhor controle do espaçamento sobre as malhas de solução. Porém, para a realização destas simulações foi utilizado um microcomputador com velocidade de processamento de 20 MHz, sendo que o tempo de processamento de uma contração, para uma velocidade de entrada e em quatro condições de viscosidade, não foi inferior a 2 horas. No total foram gastos 32 horas de processamento o que, em princípio, não é um tempo relativamente alto, mas deve-se adicionar, ainda, várias horas gastas em treinamentos para utilização do programa e na geração das malhas.

Como o principal objetivo é avaliar as distribuições das velocidades próximas às paredes das contrações, estas simulações se mostraram perfeitamente adequadas e não comprometeram as simulações posteriores.

9.2.1 Perfis de velocidades nas saídas das contrações resultantes da simulação com o programa ALGOR

Foram avaliadas as velocidades nas saídas das contrações resultantes das simulações com o programa ALGOR e indicadas nas Figura 8.13 a 8.17.

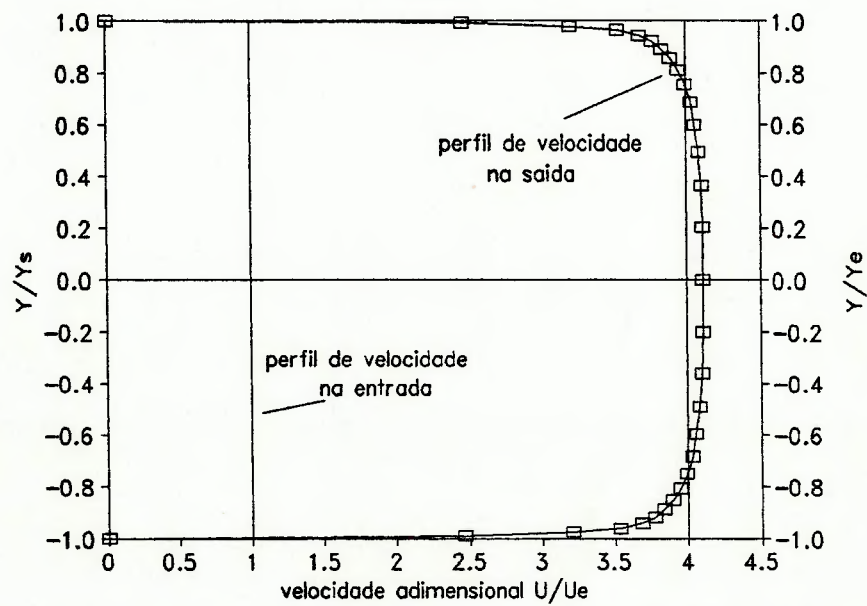


Figura 8.13 Perfil de velocidade na saída da contração de Whitehead, obtido com o programa ALGOR

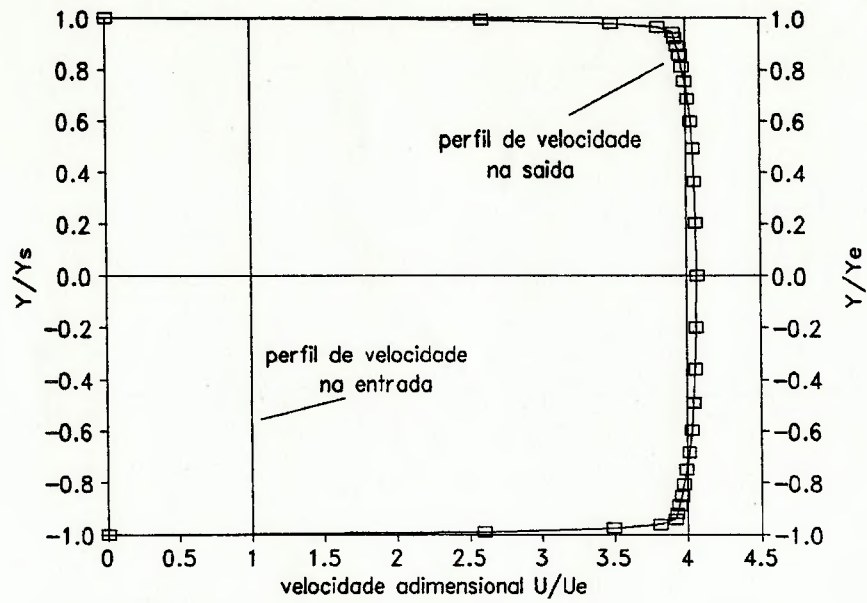


Figura 8.14 Perfil de velocidade na saída da contração de Morel, obtido com o programa ALGOR

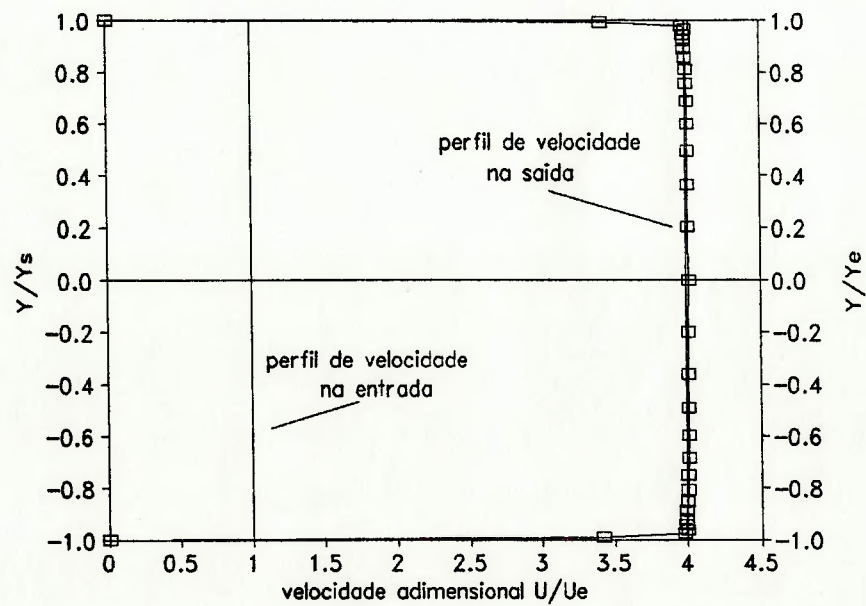


Figura 8.15 Perfil de velocidade na saída da contração de Hussain, obtido com o programa ALGOR

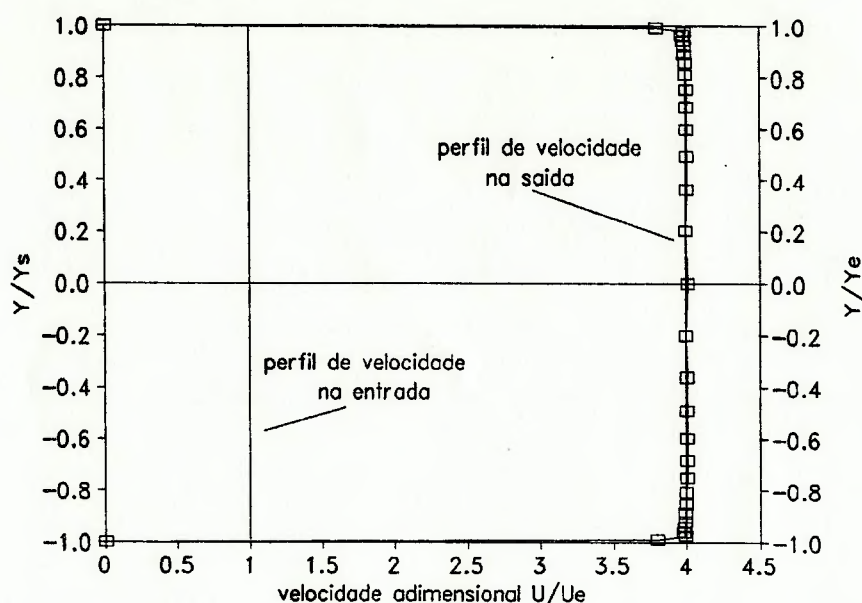


Figura 8.16 Perfil de velocidade na saída da contração de Batchelor-Shaw, obtido com o programa ALGOR

Deve-se notar nas Figuras 8.13 e 8.14, que nas contrações de Whitehead e Morel a formação de uma camada limite e um perfil de velocidade curvo, enquanto que nas contrações de Hussain e Batchelor-Shaw os perfis de velocidades foram mais uniformes e com camadas limites finas.

8.2 Resultados da simulação numérica do comportamento da camada limite

Na tabela 8.1 são indicados os resultados da simulação da espessuras de deslocamento da camada limite (δ^*) mínimo, máximo e na saída da contração, além do número de Reynolds relativo à máxima espessura da quantidade de movimento ($\theta_{\text{máx}}$), verificados no interior das contrações, para as respectivas velocidades médias na saída.

Nas Figuras 8.17 a 8.23 são apresentadas as curvas de espessura de deslocamento da camada limite e de coeficiente de atrito para as contrações de Whitehead, Morel, Hussain e Batchelor-Shaw, nas velocidades de saída identificadas na tabela 8.1, pelos números das figuras.

Tabela 8.1 Resumo das simulações do comportamento da camada limite nas contrações

contração	velocidade média na saída da contração m/s	coeficiente de atrito		espessura de deslocamento da camada limite			número de Reynolds relativo a $\theta_{máx}$	Figura	
		$C_{fmín}$ (-)	$C_{fmáx}$ (-)	δ^* mín (m)	δ^* máx (m)	δ^* saída (m)			
Whitehead	1	0,002	0,036	0,00106	0,012	0,00277	93	8.17	
	2	0,002	0,032	0,00075	0,007	0,00204	122		
	5	0,002	0,013	0,00064	0,004	0,00124	217		
	8	0,002	0,015	0,00047	0,003	0,00092	274		
	10	0,002	0,012	0,00042	0,003	0,00081	318		8.18
	20	0,002	0,008	0,00034	0,002	0,00034	568		
Morel	1**	0,000	0,159					8.19	
	2	0,002	0,014	0,00106	0,007	0,00211	116		
	5	0,001	0,008	0,00064	0,004	0,00123	167		
	10	0,003	0,006	0,00045	0,003	0,00045	249		8.20
	20	0,001	0,005	0,00038	0,002	0,00051	426		
Hussain	1**	0,000	7,471					8.21	
	2	0,002	0,011	0,0012	0,007	0,00184	100		
	5	0,001	0,007	0,00075	0,003	0,00115	150		
	10	0,001	0,005	0,00053	0,002	0,00078	216		8.22
	20	0,0013	0,005	0,00038	0,0015	0,00051	373		
Batchelor	1**	0,000	0,122					8.23	
	2 **	0,000	0,290						
Shaw	5	0,003	0,012	0,00103	0,006	0,00163	324		
	10	0,002	0,008	0,0007	0,004	0,00108	438		
	20	0,002	0,006	0,00038	0,003	0,00087	763		

** possibilidade de separação

onde:

$C_{f\text{mín}}$ e $C_{f\text{máx}}$ são os coeficientes de atrito mínimo e máximo;

$\delta^*_{\text{mín}}$, $\delta^*_{\text{máx}}$ e $\delta^*_{\text{saída}}$ são as espessuras de deslocamento da camada limite mínima, máxima e nas saída da contração;

$\theta_{\text{máx}}$ é a máxima espessura de quantidade de movimento;

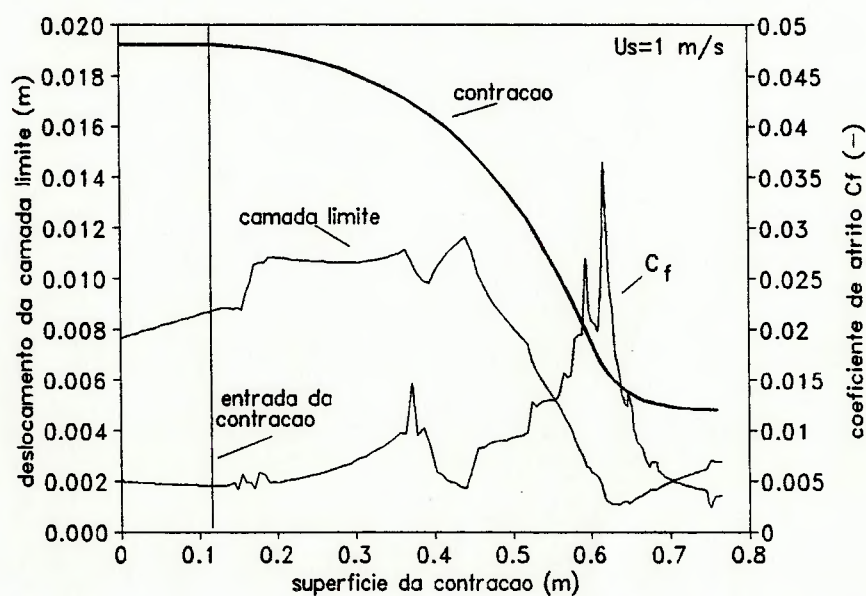


Figura 8.17 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Whitehead para velocidade de saída da contração $U_s=1$ m/s

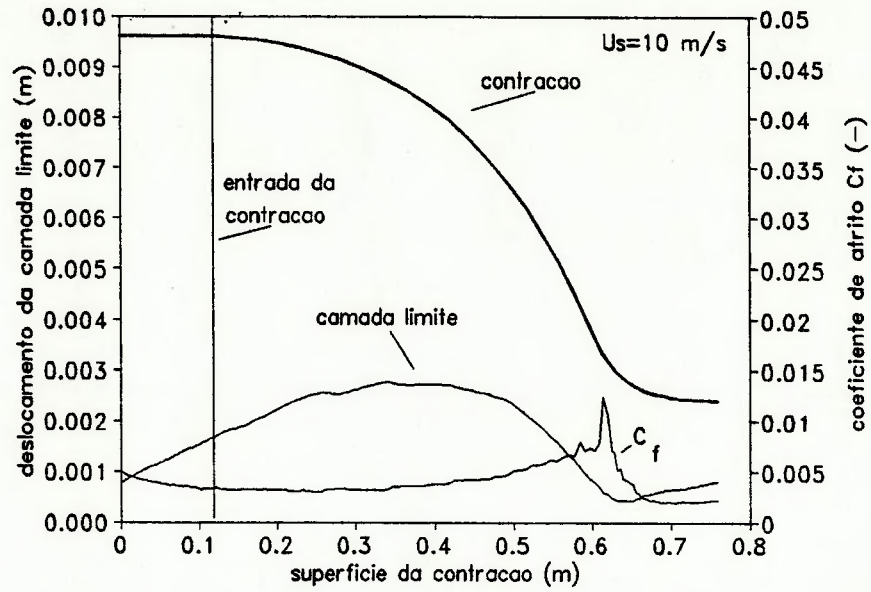


Figura 8.18 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Whitehead para velocidade de saída da contração $U_s=10$ m/s

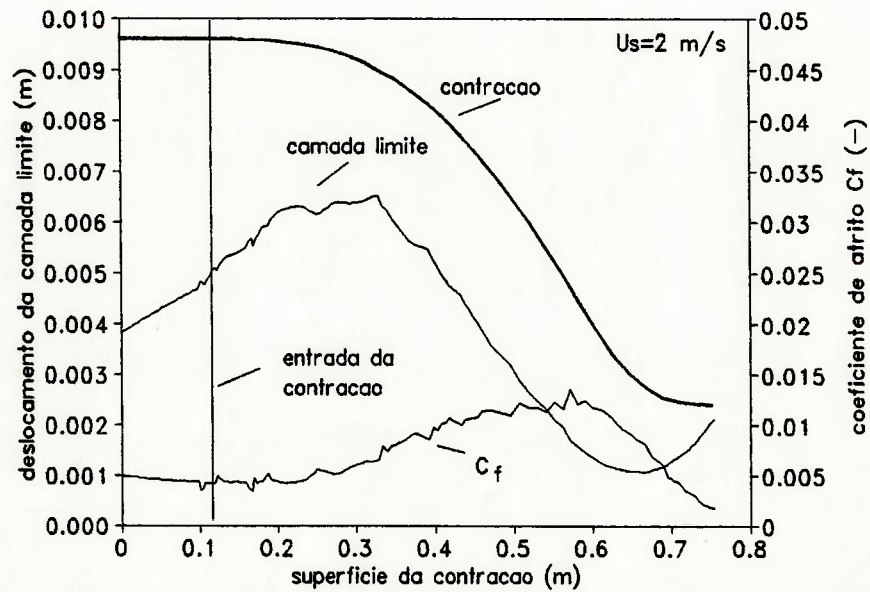


Figura 8.19 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Morel para velocidade de saída da contração $U_s=2$ m/s

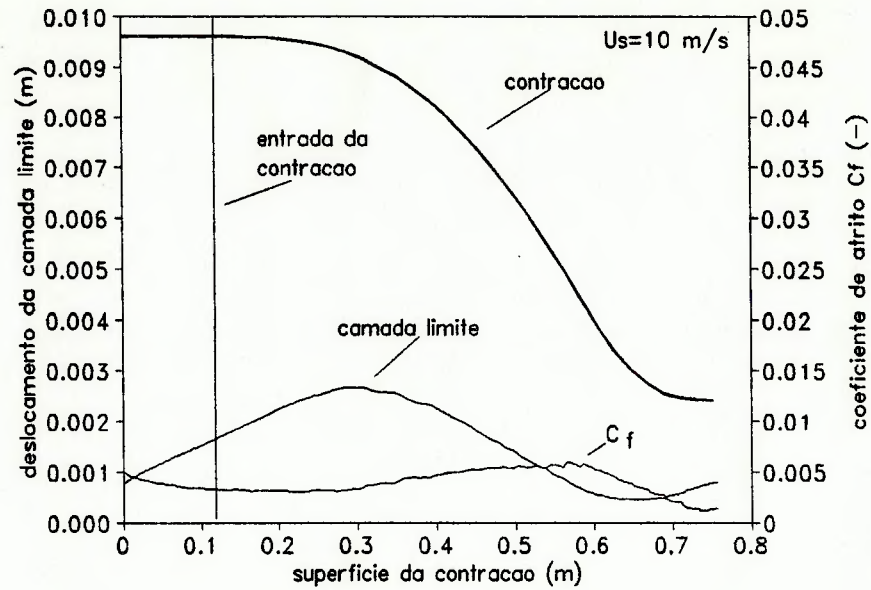


Figura 8.20 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Morel para velocidade de saída da contração $U_s = 10 \text{ m/s}$

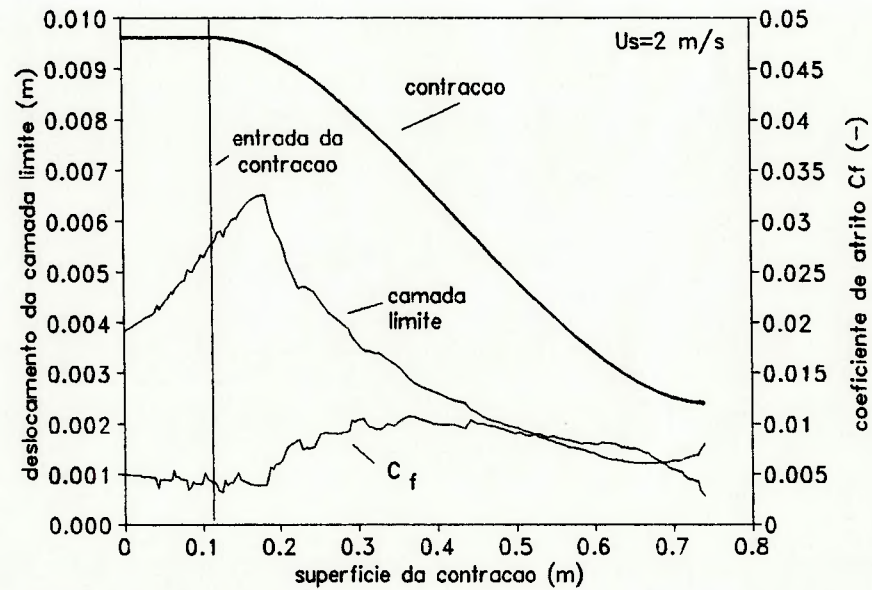


Figura 8.21 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Hussain para velocidade de saída da contração $U_s = 2 \text{ m/s}$

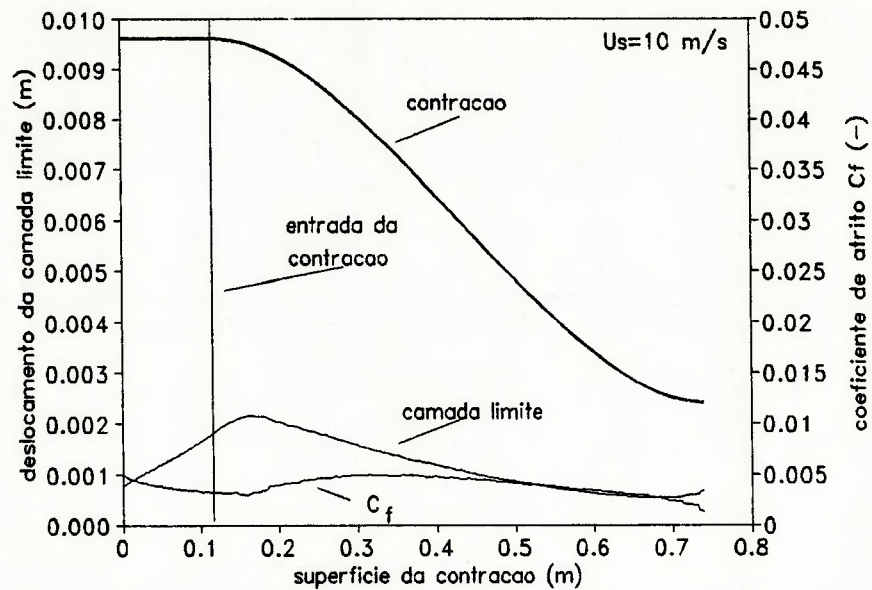


Figura 8.22 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Hussain para velocidade de saída da contração $U_s = 10 \text{ m/s}$

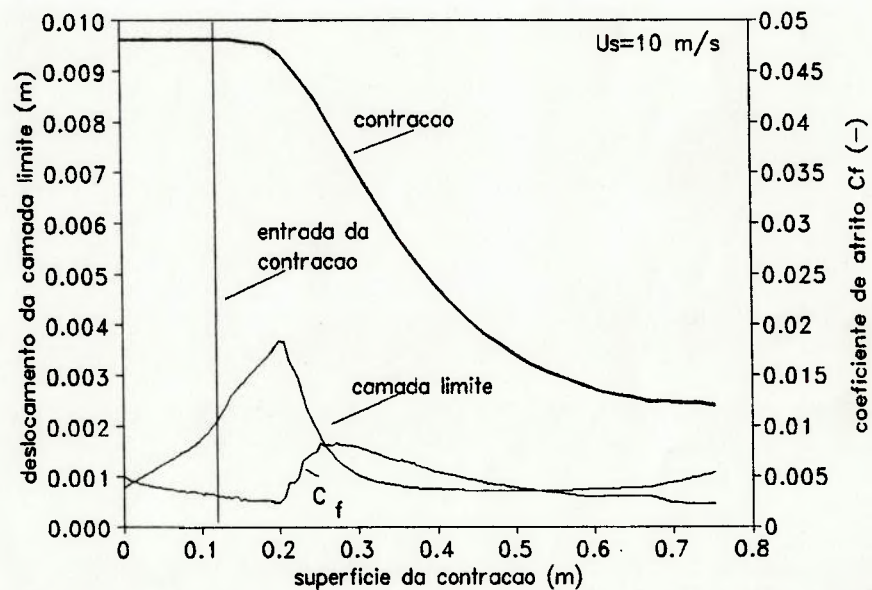


Figura 8.23 Comportamento da camada limite na superfície da contração de Batchelor-Shaw para velocidade de saída da contração $U_s = 10 \text{ m/s}$

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 8.1 e na Figura 8.17 pode-se verificar que em relação à separação do escoamento, a contração de Whitehead foi a única que não evidenciou a possibilidade de separação para a velocidade de saída de 1 m/s.

As separações do escoamento nas contrações de Morel, Hussain e Batchelor-Shaw ocorrem nas seções de entrada, mais especificamente, na região onde se formam os gradientes adversos de pressão devidos às curvaturas das paredes como pôde ser visto nas Figuras 8.10 a 8.12.

Para velocidades de saída acima de 2 m/s não há indicações de ocorrência de separação nas contrações, com exceção da contração de Batchelor-Shaw, como pode ser verificado pelas Figuras 8.19 a 8.23.

Não há indicação de separação do escoamento por atrito uma vez que foi admitida rugosidade igual a zero, na simulação. O sintoma de ocorrência de separação do escoamento também pode ser notado pela redução do coeficiente de atrito à valores muito próximos de zero, como pode ser verificado na Tabela 8.1, para as contrações de Morel, Hussain e Batchelor-Shaw.

Deve-se notar pelas Figuras 8.17 a 8.23, que os valores coeficientes de atrito decrescem à medida que a camada aumenta de espessura, e atingem valores máximos na região do ponto de inflexão das paredes das contrações. Este fato demonstra que a estabilidade da camada limite é caracterizada pelo aumento do coeficiente de atrito.

Os elevados coeficientes de atrito indicados Na Tabela 8.1 para os casos onde há possibilidade de separação, não são representativos, pois derivam das divergências das soluções do método numérico;

Em relação ao comportamento da camada limite a existência de gradientes adversos de pressão nas entradas das contrações provocaram o crescimento da espessura da camada limite, como pode ser notado nas Figuras 8.17 a 8.23. Já os gradientes positivos (favoráveis) de pressão nas saídas contrações, provocaram a redução da espessura da camada limite, tornado-as mais estáveis.

Nas contrações de Whitehead e Morel as espessuras das camadas limite atingiram os seus máximos valores nas regiões centrais da contrações, ao contrário das contrações de Hussain e Batchelor-Shaw, onde ocorreram nas regiões próximas às entradas.

Os valores máximos das espessuras das camadas limite foram inferiores a 7 mm para velocidades superiores a 2 m/s. Para velocidades baixas (≤ 2 m/s) pode-se notar, através das Figuras 8.17, 8.19 e 8.21, que as curvas da espessura da camada limite apresentam flutuações nas entradas das contrações, podendo ser decorrentes de indicações de instabilidade da camada limite, ou resultado da instabilidade do próprio método numérico.

Enquanto que, para velocidades de saída de 10 m/s, pode-se notar, através das Figuras 8.18, 8.20, 8.22 e 8.23, que as curvas da espessura da camada limite possuem contornos mais suaves, sem indicação de ocorrência de instabilidade.

Na contração de Batchelor-Shaw (Figura 8.23) nota-se, a formação de um "pico" e a sensível redução da espessura da camada limite na região central da contração, permanecendo praticamente constante com leve crescimento na região próxima à saída.

Em todas as contrações as espessuras das camadas limite nas saídas tenderam a cair à medida que a velocidade aumentava, indicando que as contrações tendem a produzir escoamentos mais estáveis em altas velocidades.

Comparando as quatro contrações em todas as velocidades, não se pode definir qual delas propicia a menor espessura da camada limite na saída para toda a faixa de velocidades simuladas.

A hipótese da não influência das paredes opostas pode ser considerada conveniente pois a relação δ^*/D_S (espessura da camada limite em relação à dimensão de saída) foi inferior a 0,01, com exceção dos casos de velocidades inferiores a 2 m/s.

Antes de analisar os valores de números Reynolds, é conveniente fazer um preâmbulo sobre o assunto.

Preston [8], estabeleceu que a condição para existência de uma camada limite turbulenta plenamente desenvolvida é $U\theta/\nu > 320$, mas a espessura da camada deverá permanecer bem abaixo deste limite para que seja estabelecida uma camada limite laminar estável.

Em todas as contrações foi admitido que a camada limite nas seções de entrada é laminar e, a medida que a velocidade e ou a espessura de quantidade de movimento aumentam, a

camada limite pode ser turbulenta na regiões centrais das contrações e, nas saídas, pode retornar ao comportamento laminar.

No caso da contração de Whitehead, para velocidades abaixo de 8 m/s, as camadas limite foram totalmente laminares, enquanto que, nas contrações de Morel e Hussain, as camadas limite foram totalmente laminares para velocidades abaixo de 10 m/s.

Já, para as demais situações, a camada limite é laminar nas entradas, passando a turbulenta, podendo ou não retornar a laminar.

8.3 Resultados experimentais

Foram realizados 5 ensaios experimentais na seção de saída do modelo de contração do túnel TVN1. Estes ensaios são denominados como:

ensaio N° 1 : medição do perfil de velocidade em toda a seção de saída da contração, para velocidade de 8 m/s;

ensaio N° 2: repetição do ensaio N° 1;

ensaio N° 3: medição do perfil de velocidade para velocidades de 3; 5; 8 e 20 m/s, sobre uma mediatriz da seção de saída da contração;

ensaio N° 4: medição das intensidades de turbulência para a velocidade de 2,5 m/s, sobre uma mediatriz

da seção de saída da contração e no eixo longitudinal da contração;

ensaio N° 5: medição das intensidades de turbulência para a velocidade de 10 m/s, sobre uma mediatriz da seção de saída da contração e no eixo longitudinal da contração.

Os dados experimentais dos ensaios são apresentados no Anexo E.

8.3.1 Perfis de velocidade na saída da contração

No ensaio N° 1 foram medidas as velocidades em toda a seção transversal, seguindo o mapeamento indicado na Figura 7.6. Foi escolhida a velocidade de 8 m/s para a realização deste ensaio por ser um valor intermediário na faixa de 0 a 20 m/s, que é a faixa de velocidades atendidas pelo conjunto da câmara de ensaio e ventilador. Para esta velocidade, as assimetrias do perfil podem ser detectadas com uma incerteza inferior a 0,1%, em função da resolução de leitura do manômetro diferencial utilizado neste ensaio.

A distribuição das velocidades pode ser vista na Figura 8.24, cuja média aritmética é 8,1 m/s e o desvio absoluto médio, em relação à média, de 0,4 %. Não foram consideradas as velocidades nos cantos.

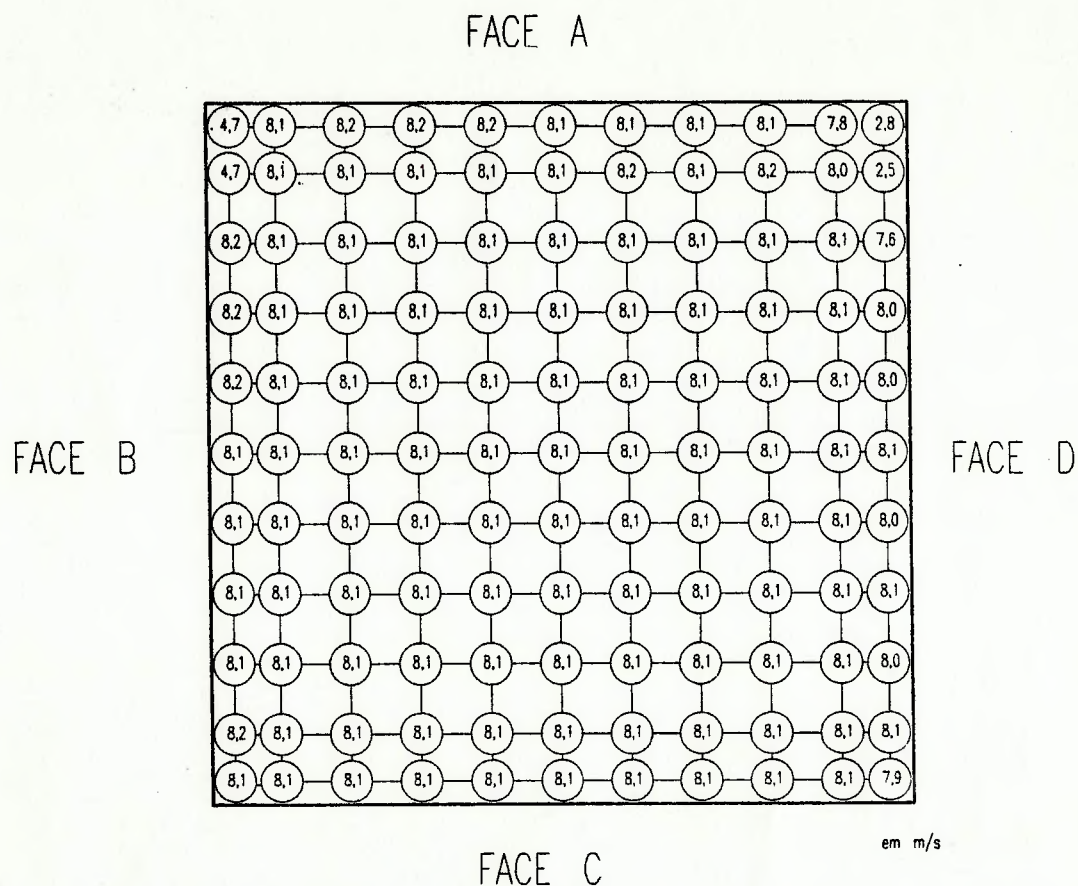


Figura 8.24 Distribuição de velocidades na saída da contração obtidos no ensaio n° 1

No ensaio N° 2 foram repetidas as mesmas condições do ensaio N° 1 para verificar a repetibilidade das medições.

A distribuição das velocidades pode ser vista na Figura 8.25, cuja média aritmética é 8,2 m/s e o desvio absoluto médio de 0,4 %.

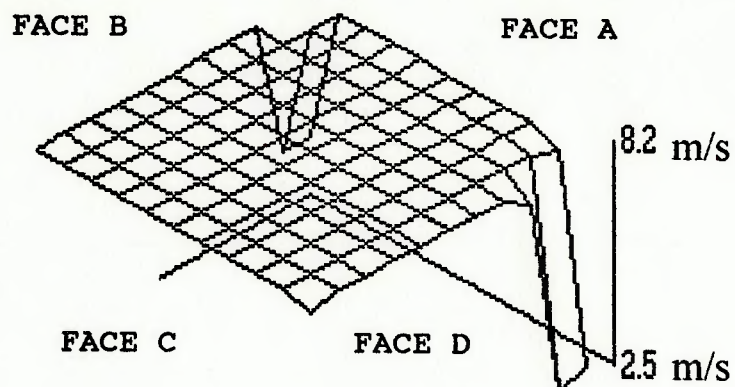


Figura 8.26 Distribuição tridimensional de velocidades na saída da contração obtidos no ensaio nº 1

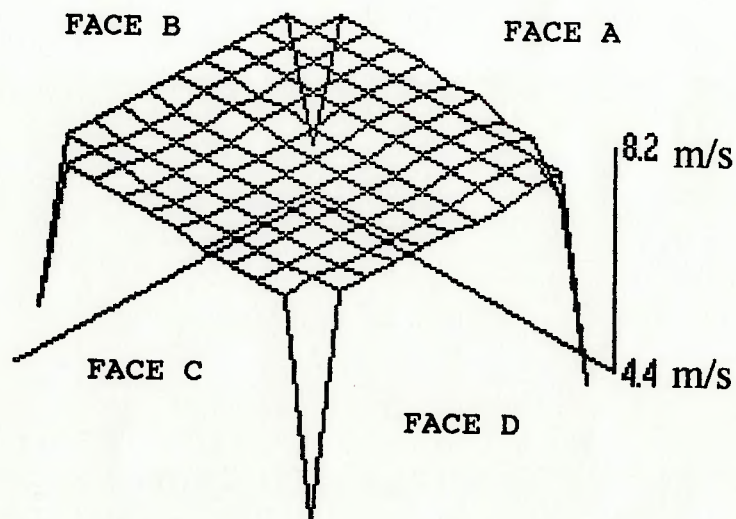


Figura 8.27 Distribuição tridimensional de velocidades na saída da contração obtidos no ensaio nº 2

As velocidades nos cantos do ensaio N^o 1 não foram reproduzidas no ensaio N^o 2. Este fato foi provocado, provavelmente, pela folga do dispositivo de posicionamento do tubo de Pitot.

Já no ensaio N^o 3, foram medidos os perfis de velocidades para velocidades médias 3,1; 5,1; 8,1; 9,8 e 19,7 m/s, no eixo horizontal, formado pela mediatriz das arestas nas faces D e B, como pode ser visto na Figura 8.28. Os desvios absolutos médios foram inferiores a 0,3%, em relação às respectivas velocidades média.

Deve-se notar no Anexo E que os maiores desvios ocorreram para as velocidades de 3 e 5 m/s, podendo ser justificados pela maior incerteza da medição de pressão do manômetro diferencial, em baixas velocidades.

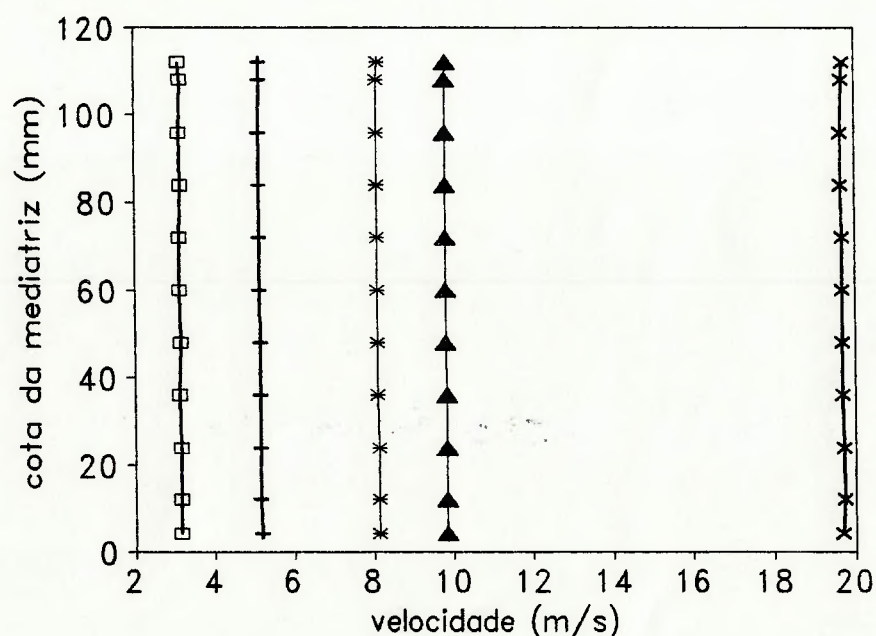


Figura 8.28 Perfis de velocidades nas saída da contração, obtidos experimentalmente no ensaio N^o 3

Deve-se notar através da Figura 8.29 a), que o perfil de velocidade adimensional gerado pelo programa ALGOR é diferente dos perfis adimensionais obtidos experimentalmente.

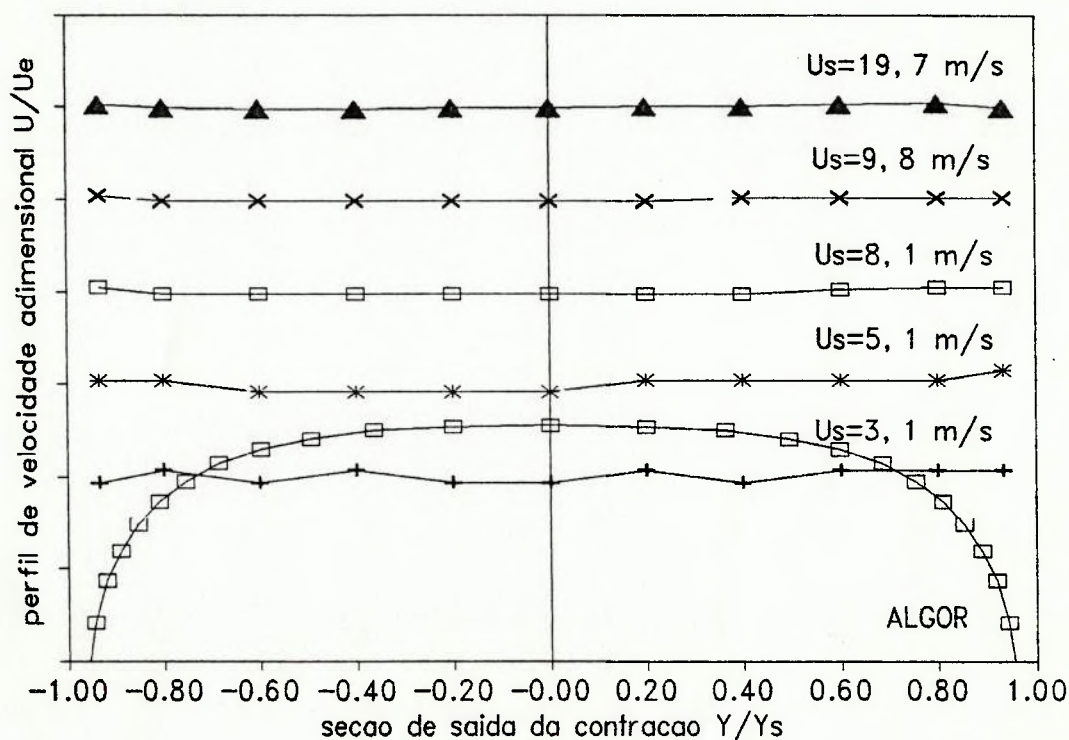


Figura 8.29 a) Perfis de velocidades adimensionais nas saídas da contração, obtidos experimentalmente no ensaio N° 3 e pelo programa ALGOR

Esta diferença entre a simulação numérica e os ensaios experimentais deve ser cuidadosamente interpretada.

Como foi mostrado no item 8.1.3 a simulação numérica do escoamento potencial da contração de Whitehead indicou a formação de uma camada limite, pois a malha de solução utilizada no programa ALGOR não foi adequada para detalhar convenientemente a camada limite.

Para se certificar que as diferenças dos perfis de velocidades obtidos experimentalmente e o gerado pelo

programa ALGOR, não foram provocadas pela utilização de valores de viscosidade e massa específica diferentes, o escoamento na contração de Whitehead foi resolvido, com o programa ALGOR, para um perfil de velocidade constante e igual a 2,5 m/s na entrada, viscosidade dinâmica de $1,8 \times 10^{-5}$ Pa.s e massa específica de $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Os resultados dessa nova simulação podem ser vistos na Figura 8.29 b), onde se verifica que mesmo trabalhando em condições semelhantes às dos ensaios experimentais, o programa ALGOR gerou um perfil de velocidade bastante diferente.

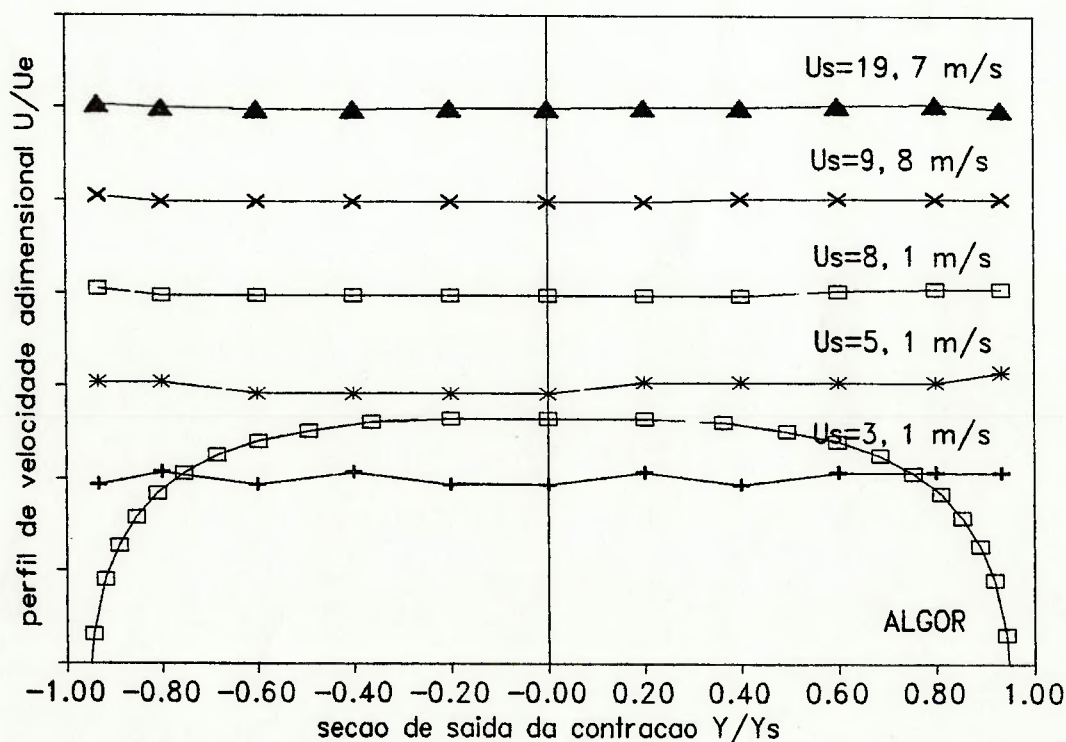


Figura 8.29 b) Perfis de velocidades adimensionais na saída da contração de Whitehead, obtidos experimentalmente no ensaio N° 3 e pelo programa ALGOR (para viscosidade dinâmica de $1,8 \times 10^{-5}$ Pa.s e massa específica de $1,2 \text{ kg/m}^3$)

Pode-se concluir que, como programa ALGOR foi desenvolvido para resolver problemas de escoamento laminar, os resultados não são representativos para elevados números de Reynolds. Deve-se adicionar ainda a este fato, o problema da não definição das condições de contorno de jato livre, que podem ter contribuído significativamente para a distorção dos resultados na saída da contração.

Se forem combinados a estes resultados as espessuras das camadas limite obtidas pelo programa STAN7A (Tabela 8.1), pode-se concluir que os novos perfis de velocidades serão praticamente idênticos aos resultados experimentais.

8.3.2 Intensidade de turbulência na saída da contração

Nas Figuras 8.30 e 8.31 são mostrados as intensidades de turbulência sobre o mesmo eixo horizontal do ensaio N° 3, porém com um menor espaçamento nas regiões próximas às paredes, para velocidades de 2,5 e 10 m/s.

Foram escolhidas estas velocidades em função da faixa de calibração da sonda de fio quente, como pode ser visto no Anexo D.

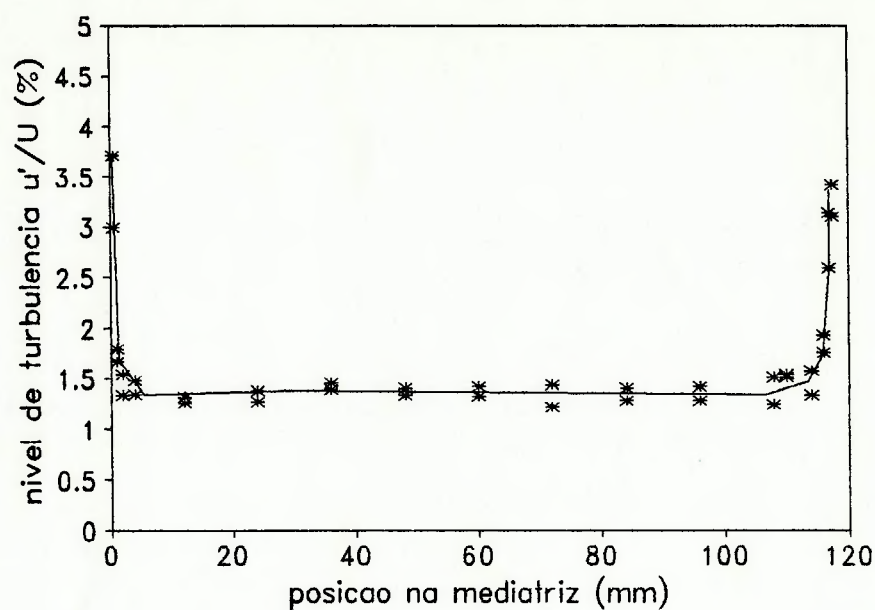


Figura 8.30 Intensidades de turbulência na saída da contração para velocidade média de 2,5 m/s, obtidos experimentalmente no ensaio N^o 4

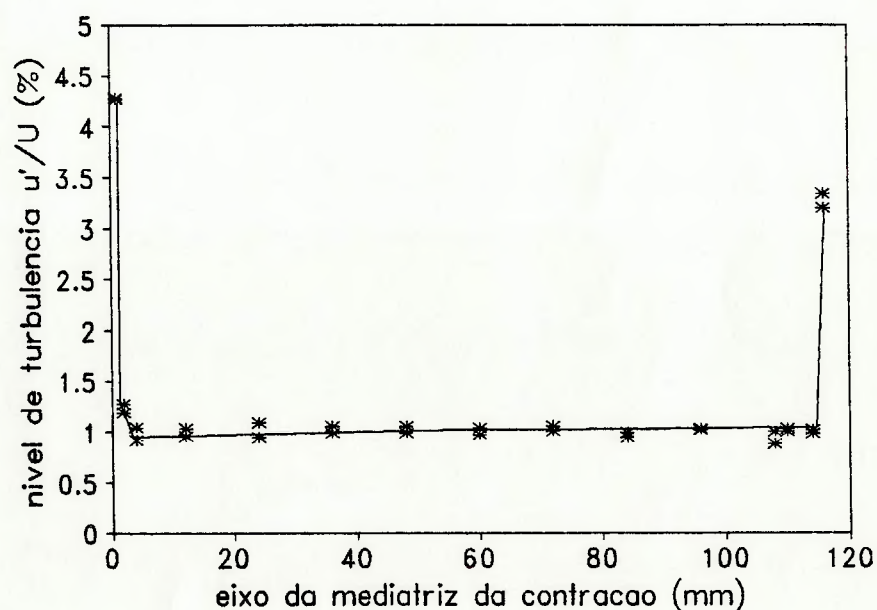


Figura 8.31 Intensidades de turbulência na saída da contração para velocidade média de 10 m/s, obtidos experimentalmente no ensaio N^o 5

Para a velocidade de 2,5 m/s a intensidade de turbulência média na região fora da influência das paredes foi de

aproximadamente 1,3%, já para a velocidade de 10 m/s o valor médio foi de 1%.

Na parede pode-se observar o aumento significativo da magnitude da intensidade de turbulência, podendo ser indicativo de ocorrência de separação do escoamento.

8.3.3 Intensidade de turbulência no eixo longitudinal da contração

Na Figuras 8.32 e 8.33 são mostrados as intensidades de turbulência medidas sobre o eixo horizontal da contração, para velocidades médias na saída da contração de 2,5 e 10 m/s.

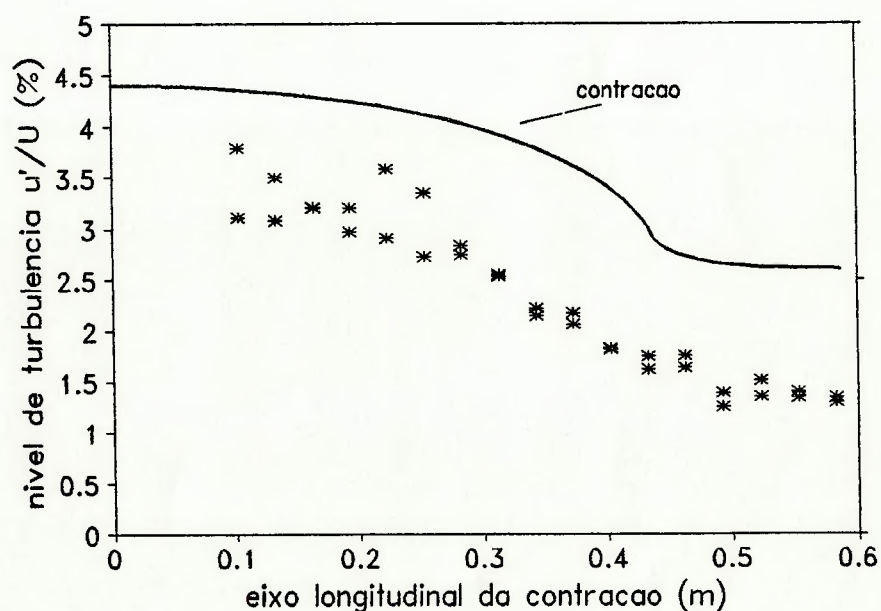


Figura 8.32 Intensidades de turbulência no eixo longitudinal da contração para velocidade média de 2,5 m/s, obtidos experimentalmente no ensaio N° 4

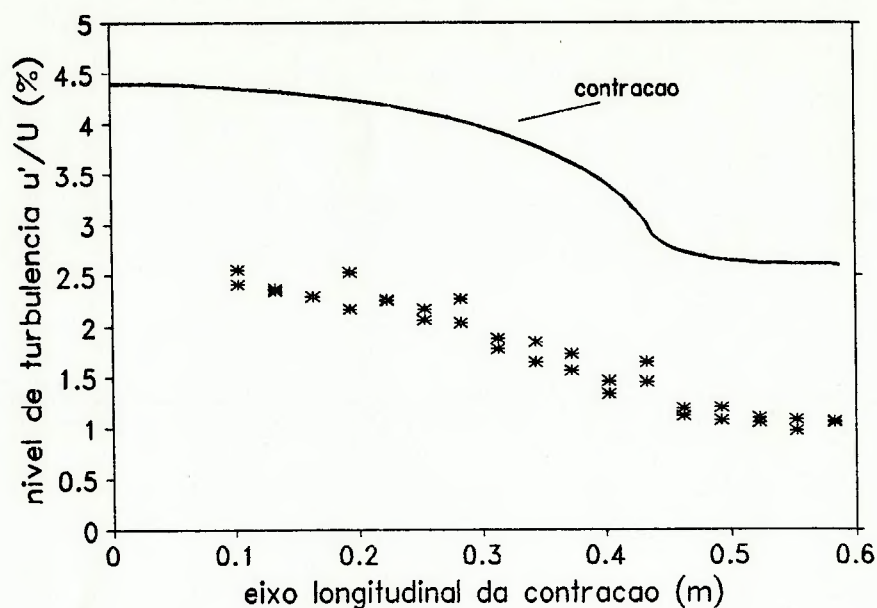


Figura 8.33 Intensidades de turbulência no eixo longitudinal da contração para velocidade média de 10 m/s, obtidos experimentalmente no ensaio N° 5

Não foi possível realizar medições em todo o eixo longitudinal porque o dispositivo posicionador bloqueava o escoamento na saída, podendo mudar a vazão do ventilador. Desses resultados pode-se concluir que, para as velocidades de saída de 2,5 e 10 m/s, não há indicação de geração de turbulência no interior da contração.

Os valores são relativamente altos devido ao pequeno comprimento da câmara de estabilização e também da não eficiência das telas perfuradas.

Embora as velocidades no interior das contrações tenham atingidos valores inferiores a 2 m/s, as intensidades turbulentas podem ser estimadas pela equação 7.2, admitindo-se que a curva de calibração do fio quente possa ser extrapolada para valores inferiores a 2 m/s.

8.3.4 Flutuação de velocidade induzida próxima às paredes da contração

Para investigar a origem dos altos valores de intensidades de turbulência nas regiões próximas às paredes, o anemômetro de fio quente foi posicionado a uma distância de aproximadamente 0,5 mm da superfície da parede.

As medições das flutuações de velocidades e o seu espectro de frequência indicaram uma frequência característica de 11,25 Hz, como pode ser visto na Figura 8.34.

Esta frequência característica é decorrente do desbalanceamento do rotor do ventilador, que induziu a vibração de todo o conjunto, inclusive a contração, na rotação de 840 rpm.

Posteriormente, a sonda de fio quente foi posicionada à uma distância de 4 mm da parede e não foi verificado nenhuma frequência característica das flutuações de velocidades. Deste resultado, pode-se concluir que as flutuações de velocidades são decorrentes do fenômeno de turbulência, caracterizado pela aleatoriedade do sinal no espectro de frequência mostrado na Figura 8.35.

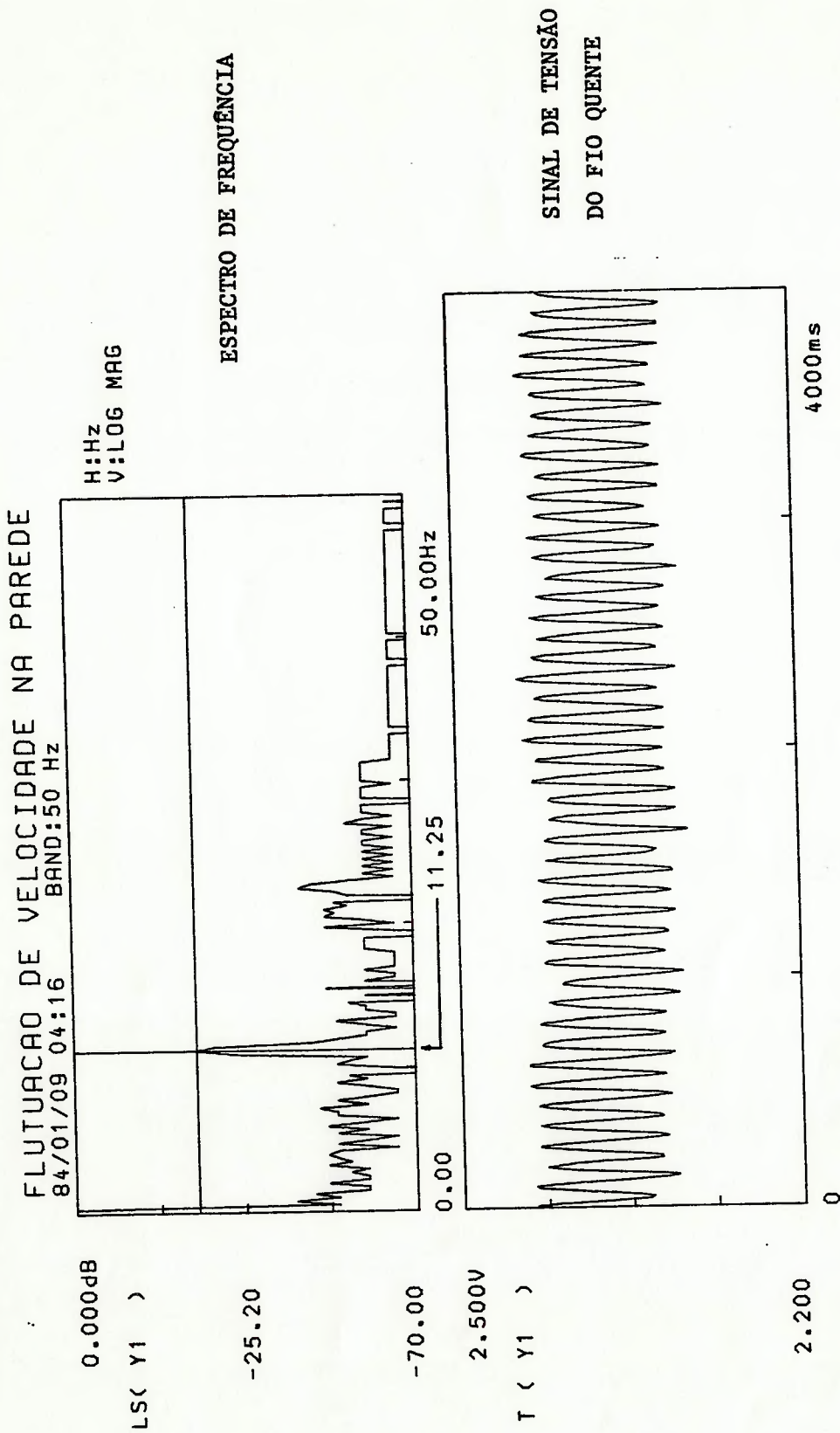


Figura 8.34 Espectro de frequência da flutuação de velocidade nas proximidades da parede da contração

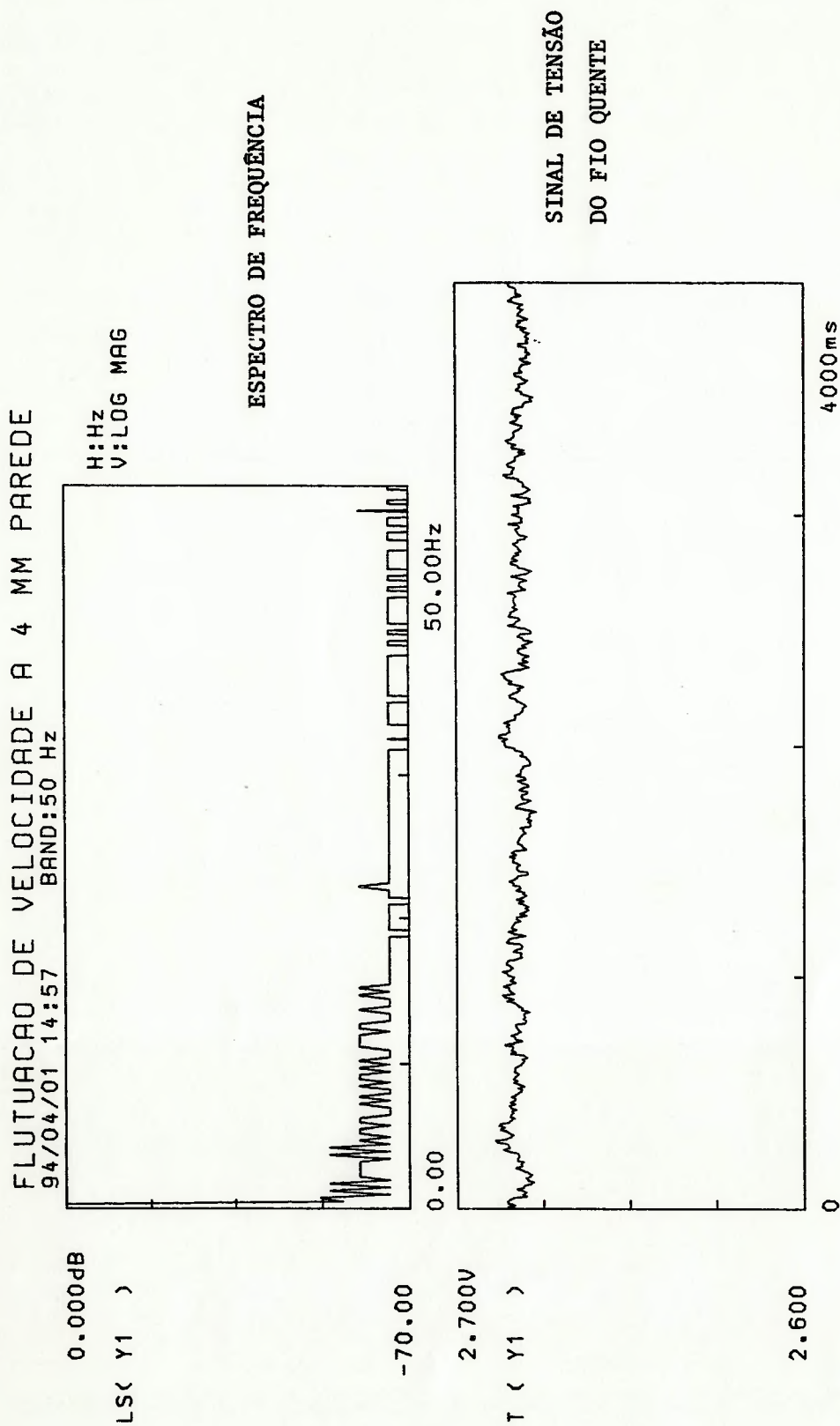


Figura 8.35 Espectro de frequência da flutuação de velocidade a uma distância de 4 mm da parede da contração

8.4 Verificação dimensional da contração

Foram verificados os desvios de forma das superfícies da contração em uma máquina tridimensional Mitutoyo. Foram levantados para cada superfície ao redor de 980 pontos, com uma incerteza de 0,2 mm. A curva de desvio de forma média pode ser vista na Figura 8.36.

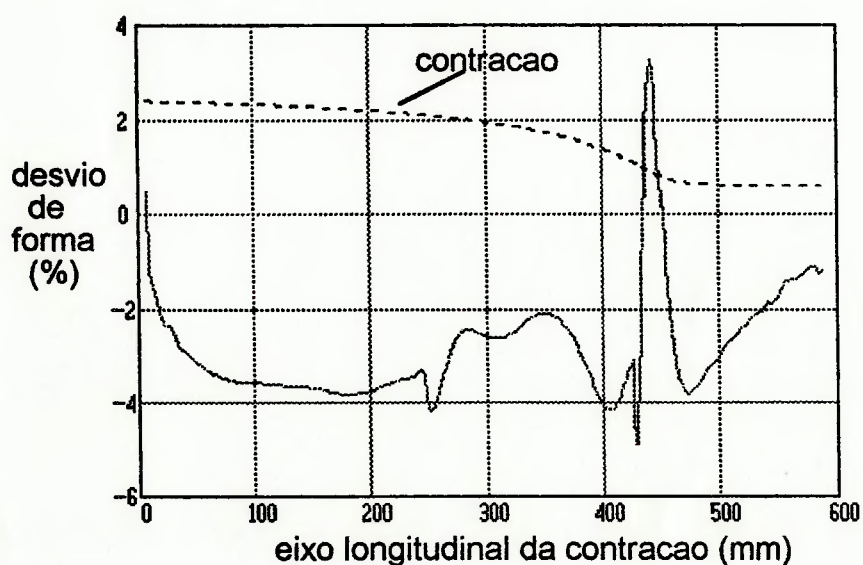


Figura 8.36 Aferição dimensional da contração de Whitehead

Os maiores desvios de forma ocorreram na região da "garganta" da contração, que podem ser explicados pela característica plástica das chapas de PVC que tendem a resistir as acentuadas curvaturas dessa região.

Os desvios não são significativos para invalidar as análises numéricas do escoamento sobre a superfície.

10 CONCLUSÕES

Como pôde ser verificado no capítulo anterior, as quatro geometrias de contrações apresentaram comportamentos distintos na simulação do escoamento potencial.

Os perfis de velocidade mostrados nas Figuras 8.13 a 8.16, indicam que as geometrias de contrações de Hussain e Batchelor-Shaw são as mais indicadas para a geração de um perfil de velocidade uniforme.

Estas diferenças ocorreram devido à "mistura" das linhas de corrente nas seções de máximas curvaturas das contrações de Whitehead e Morel, e a formação de camadas limite mais espessas.

Como o objetivo principal da simulação numérica do escoamento potencial foi conhecer as distribuições de velocidades potenciais próximas às paredes, estes problemas não afetaram as soluções subseqüentes, nas simulações das camadas limite.

A distribuição de velocidades potenciais na parede, gerada pelo programa CONTRAC, para a contração de Whitehead foi compatível aos resultados gerados pelo programa ALGOR, como pôde ser visto na Figura 8.9, garantindo assim a sua confiabilidade.

Em relação à possibilidade de separação do escoamento, a contração de Whitehead foi a que apresentou a melhor estabilidade da camada limite para baixos números de Reynolds, enquanto que para maiores valores de números de

Reynolds as quatro contrações se comportaram de forma semelhante.

Não foi possível distinguir, através do programa STAN7A, qual das contrações produz a menor espessura de camada limite na saída.

Comparando as espessuras das camadas limite avaliadas pelo programa STAN7A (Tabela 8.1) e as medidas experimentais (ensaios N^o 4 e 5 do Anexo E) para a contração de Whitehead, pode-se notar que para a velocidade de saída de aproximadamente de 2 m/s as espessuras das camadas limite foram 2 e 1 mm, e para velocidade de 10 m/s as espessuras foram 0,8 e 1,5 mm, respectivamente.

Apesar dessas medidas experimentais estarem afetadas pelo problema do desbalanceamento do ventilador (mostrado no item 8.3.4) os resultados podem ser considerados equivalentes, aos previstos pelo programa STAN7A.

Embora estas observações sejam importantes para uma análise comparativa, não se pode tirar conclusões definitivas baseadas somente nestas quatro geometrias de contrações, pois não foram avaliados os comprimentos ótimos e os respectivos parâmetros que controlam a distribuição de curvaturas.

Notadamente, esta metodologia numérica tem um caráter exploratório, possibilitando que várias geometrias de contrações possam ser analisadas criteriosamente, resultando assim na otimização das soluções, redução de custos, mão-de-obra empregada e tempo dispendido.

Um exemplo de aplicação pode ser visto no Anexo F, onde a contração de Whitehead foi avaliada para uma condição de assimetria do perfil de velocidade de entrada de 5%, indicado na Figura F.2. A análise do resultado indicou que a contração foi efetiva, não sendo verificada a assimetria do perfil de velocidade na saída.

Um outro exemplo de aplicação desta metodologia é na avaliação de mecanismos que possibilitem a redução da espessura da camada limite na seção de testes de túneis de vento, como por exemplo, o uso de um difusor, com pequeno ângulo de inclinação, na saída da contração, que foi utilizado no túnel de vento de circuito aberto do NPL, mostrado na Figura 3.5. Uma outra forma muito utilizada é a "sucção" da camada limite da seção de testes, que foi utilizada por Watts et.al. [31] no projeto de um túnel de vento para estudos de camada limite.

Em relação às medidas experimentais de turbulência mostradas nas Figuras 8.32 e 8.33, pode-se verificar que a contração de Whitehead é efetiva na redução da intensidade de turbulência no eixo longitudinal, e a sua magnitude diminui com o aumento do número de Reynolds.

Entretanto, para reduzir significativamente as magnitudes das intensidades de turbulência na saída da contração deve-se promover um melhor dimensionamento das demais partes integrantes do túnel de vento: telas, colméia e câmaras de estabilização.

Assim, a metodologia experimental desenvolvida poderá ser utilizada na avaliação e qualificação do escoamento em

túneis de vento, permitindo verificar as simetrias dos perfis de velocidades, quantificar as intensidades de turbulência e identificar possíveis perturbações induzidas no escoamento.

Em suma a definição de uma geometria de contração dependerá da aplicação a ser dada ao túnel de vento, tendo como parâmetros as características necessárias para o escoamento na seção de testes.

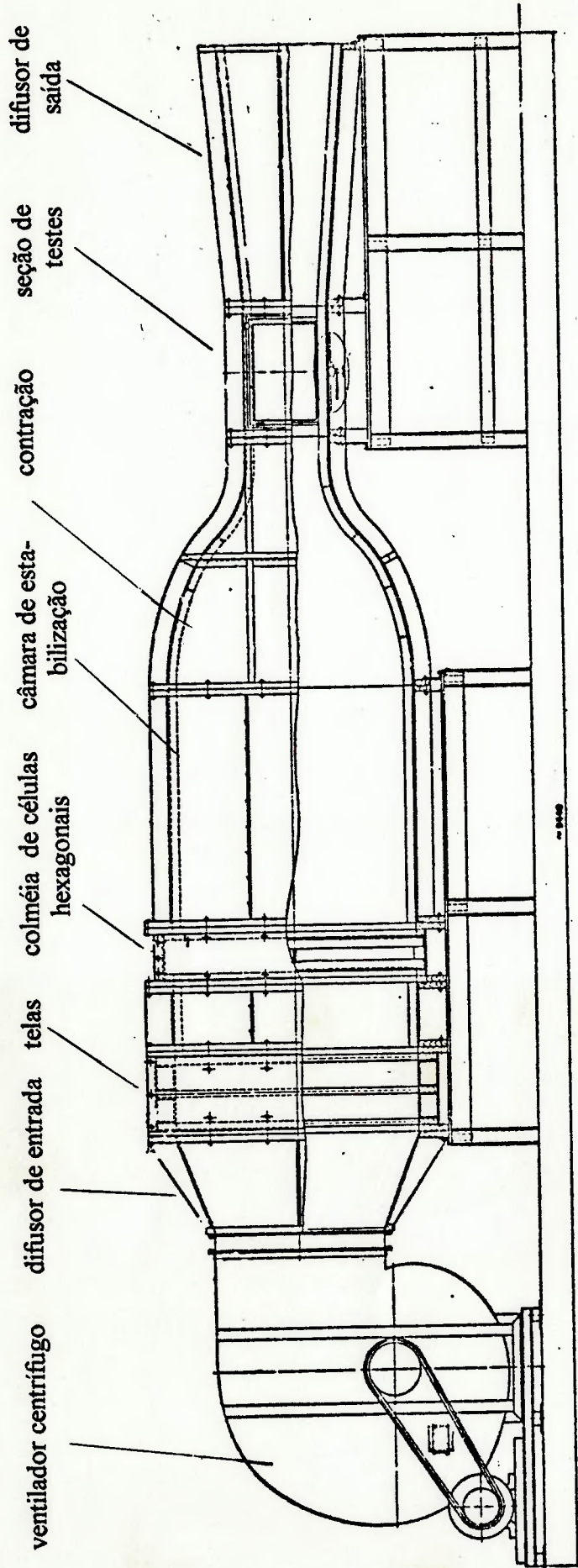
Para o caso de túneis de vento destinados a ensaios de camada limite, o parâmetro principal é a turbulência do escoamento externo, pois a estabilidade da camada limite sobre superfícies como placas planas ou perfis aerodinâmicos é muito influenciada pela magnitude da intensidade turbulenta.

Para os ensaios de aferição de anemômetros e de força de arrasto a uniformidade do perfil de velocidade é o parâmetro mais importante, embora seja também conveniente a baixa intensidade de turbulência.

Em relação às várias técnicas de geração de geometrias de contrações, não é possível definir, claramente, qual delas é a mais indicada para cada aplicação, pois os exemplos indicados no capítulo 6 não se mostraram conclusivos.

Assim a qualificação de uma da contração para túnel de vento não poderá ser assumida sem uma avaliação numérica ou experimental, sendo que a metodologia de avaliação proposta neste trabalho se mostrou perfeitamente adequada a este propósito.

Dada a sua praticidade e rapidez na obtenção de resultados, esta metodologia de avaliação poderá ser utilizada também na análise do escoamento em bocais, tubos Venturi, ejetores e também em escoamentos sobre superfícies e corpos aerodinâmicos.



TVN1 - TÚNEL DE VENTO DO LABORATÓRIO DE VAZÃO DO IPT

- . circuito aberto;
- . seção de entrada da contração: 1,5 x 1,5 m;
- . seção de testes quadrada de 0,5 x 0,5 m, devido às facilidades de construção e fixação de medidores;
- . velocidade máxima na seção de teste de 50 m/s;
- . uniformidade do perfil de velocidade na seção de teste $\pm 0,5\%$ da velocidade média;
- . flutuação da velocidade axial inferior a 0,5%;
- . comprimento total de 9 m aproximadamente.

A N E X O B

COTAS DOS PERFIS DAS CONTRACOES DE WHITEHEAD, MOREL, HUSSAIN E BATCHELOR-SHAW

WHITEHEAD

MOREL

HUSSAIN

BATCHELOR-SHAW

X (m)	Y WWW (m)	Y MOREL (m)
0.0000	0.2400	0.2400
0.0276	0.2394	0.2400
0.0552	0.2382	0.2397
0.0827	0.2365	0.2391
0.1101	0.2343	0.2379
0.1374	0.2315	0.2359
0.1646	0.2281	0.2329
0.1916	0.2240	0.2288
0.2183	0.2191	0.2234
0.2446	0.2133	0.2167
0.2704	0.2064	0.2085
0.2955	0.1984	0.1989
0.3196	0.1893	0.1880
0.3425	0.1788	0.1760
0.3637	0.1672	0.1634
0.3829	0.1545	0.1505
0.3998	0.1411	0.1382
0.4140	0.1273	0.1269
0.4252	0.1138	0.1175
0.4334	0.1012	0.1103
0.4383	0.0908	0.1059
0.4436	0.0839	0.1012
0.4502	0.0790	0.0958
0.4573	0.0751	0.0905
0.4646	0.0721	0.0857
0.4721	0.0697	0.0813
0.4797	0.0677	0.0774
0.4874	0.0661	0.0739
0.4951	0.0649	0.0710
0.5028	0.0638	0.0685
0.5106	0.0630	0.0664
0.5183	0.0623	0.0646
0.5261	0.0617	0.0633
0.5338	0.0613	0.0622
0.5416	0.0609	0.0614
0.5493	0.0607	0.0608
0.5571	0.0604	0.0604
0.5649	0.0603	0.0602
0.5726	0.0601	0.0601
0.5804	0.0600	0.0600
0.5882	0.0600	0.0600

X (m)	Y HUSSAIN (m)
0.0000	0.2400
0.0147	0.2397
0.0294	0.2387
0.0441	0.2371
0.0588	0.2350
0.0735	0.2323
0.0882	0.2291
0.1029	0.2254
0.1176	0.2213
0.1323	0.2168
0.1471	0.2119
0.1618	0.2066
0.1765	0.2011
0.1912	0.1953
0.2059	0.1893
0.2206	0.1830
0.2353	0.1766
0.2500	0.1701
0.2647	0.1635
0.2794	0.1567
0.2941	0.1500
0.3088	0.1433
0.3235	0.1365
0.3382	0.1299
0.3529	0.1234
0.3676	0.1170
0.3823	0.1107
0.3970	0.1047
0.4117	0.0989
0.4264	0.0934
0.4412	0.0881
0.4559	0.0832
0.4706	0.0787
0.4853	0.0746
0.5000	0.0709
0.5147	0.0677
0.5294	0.0650
0.5441	0.0629
0.5588	0.0613
0.5735	0.0603
0.5882	0.0600

X (m)	Y BSHAW (m)
0.0151	0.2400
0.0302	0.2400
0.0453	0.2398
0.0603	0.2389
0.0754	0.2363
0.0905	0.2311
0.1056	0.2226
0.1207	0.2112
0.1357	0.1977
0.1508	0.1836
0.1659	0.1699
0.1810	0.1572
0.1961	0.1457
0.2111	0.1354
0.2262	0.1263
0.2413	0.1182
0.2564	0.1111
0.2715	0.1048
0.2866	0.0992
0.3016	0.0942
0.3167	0.0897
0.3318	0.0858
0.3469	0.0822
0.3620	0.0790
0.3771	0.0762
0.3921	0.0736
0.4072	0.0714
0.4223	0.0693
0.4374	0.0676
0.4525	0.0660
0.4675	0.0647
0.4826	0.0635
0.4977	0.0625
0.5128	0.0617
0.5279	0.0611
0.5430	0.0606
0.5580	0.0603
0.5731	0.0601
0.5882	0.0600

A N E X O C

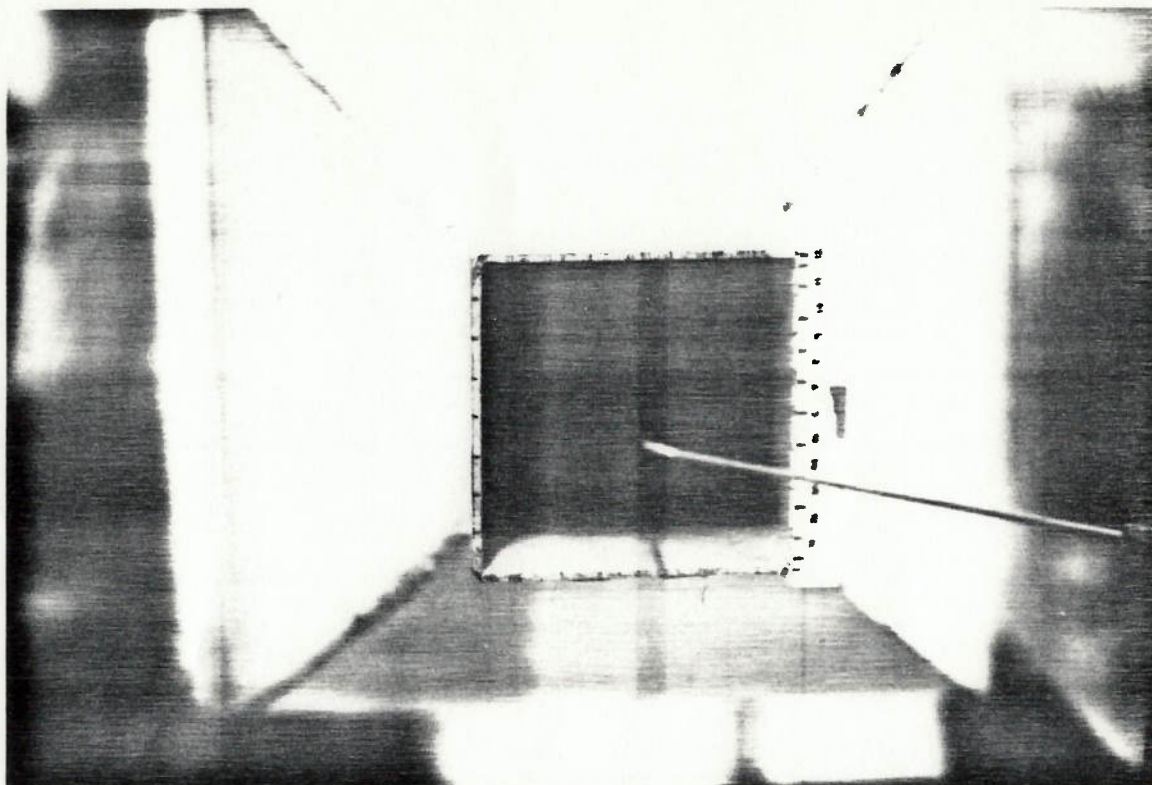


Foto 1 Vista frontal da seção de saída da contração com o tubo de Pitot. A escala ao lado direito foi utilizada como referência visual

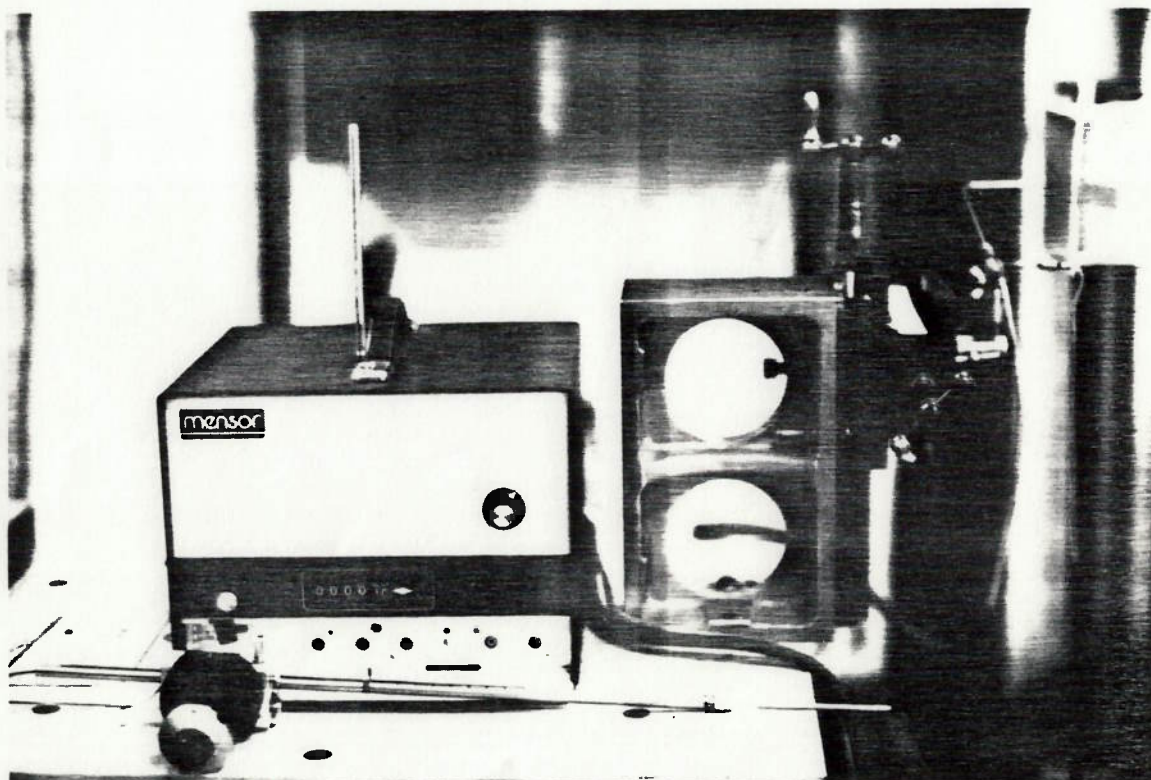


Foto 2 Visão da instrumentação. à esquerda o transdutor de pressão utilizado na medição da velocidade; no centro, a mesa de coordenadas X-Y; à direita, detalhe da fixação do tubo de Pitot.

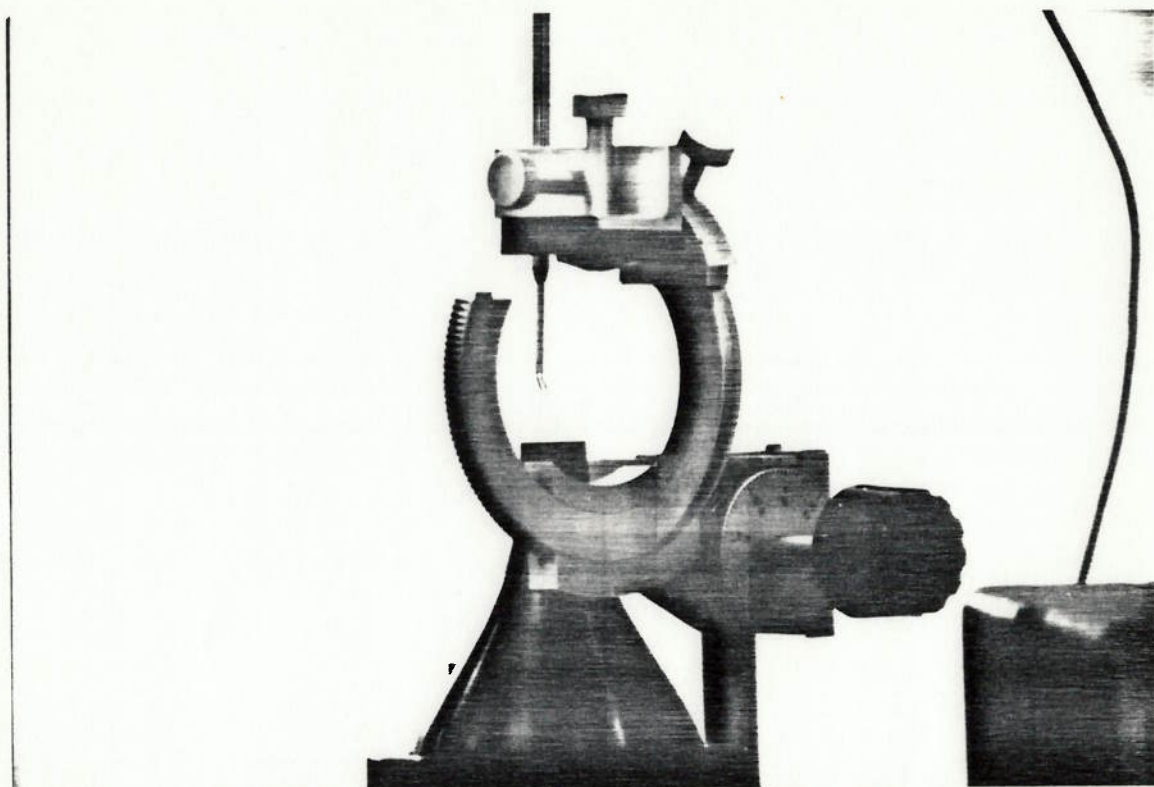


Foto 3 Detalhe do dispositivo de calibração da sonda de fio quente formado por um bocal de seção de saída de 120 mm²

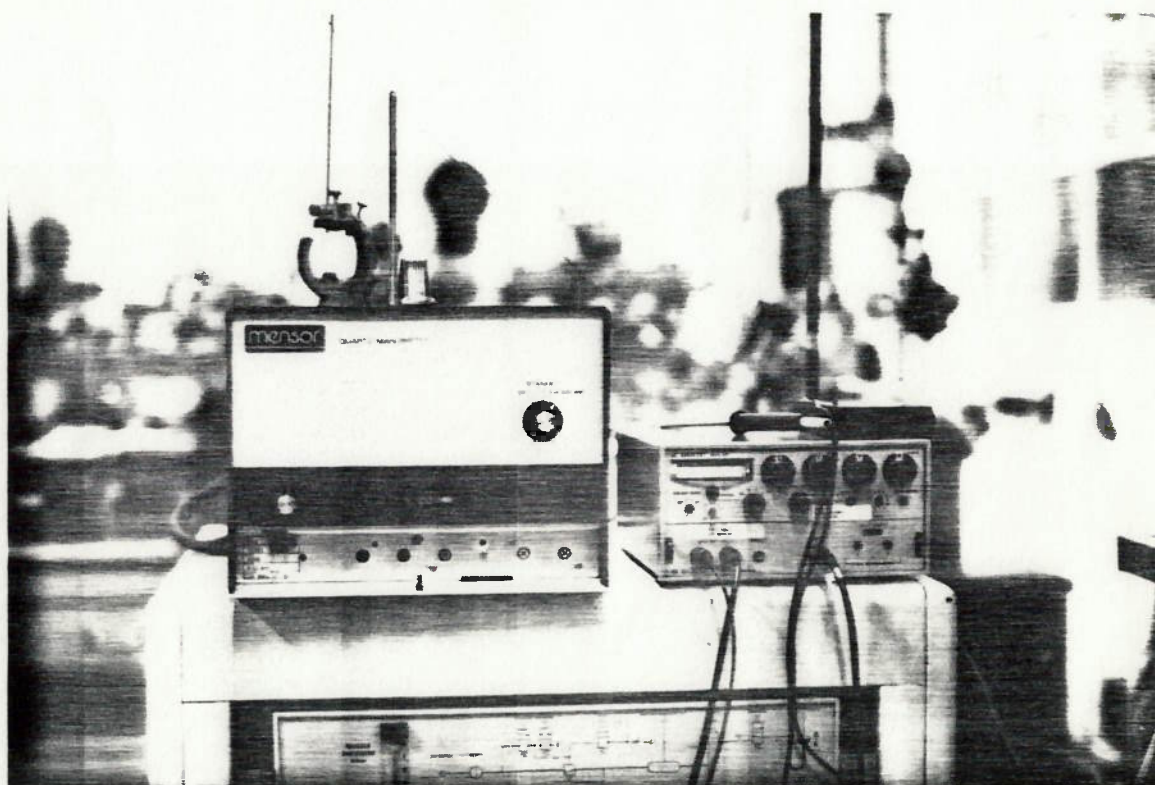


Foto 4 Visão da instrumentação de calibração da sonda. A esquerda o transdutor de pressão utilizado na medição da pressão diferencial no bocal; à direita a fonte e a ponte do anemômetro de fio quente.

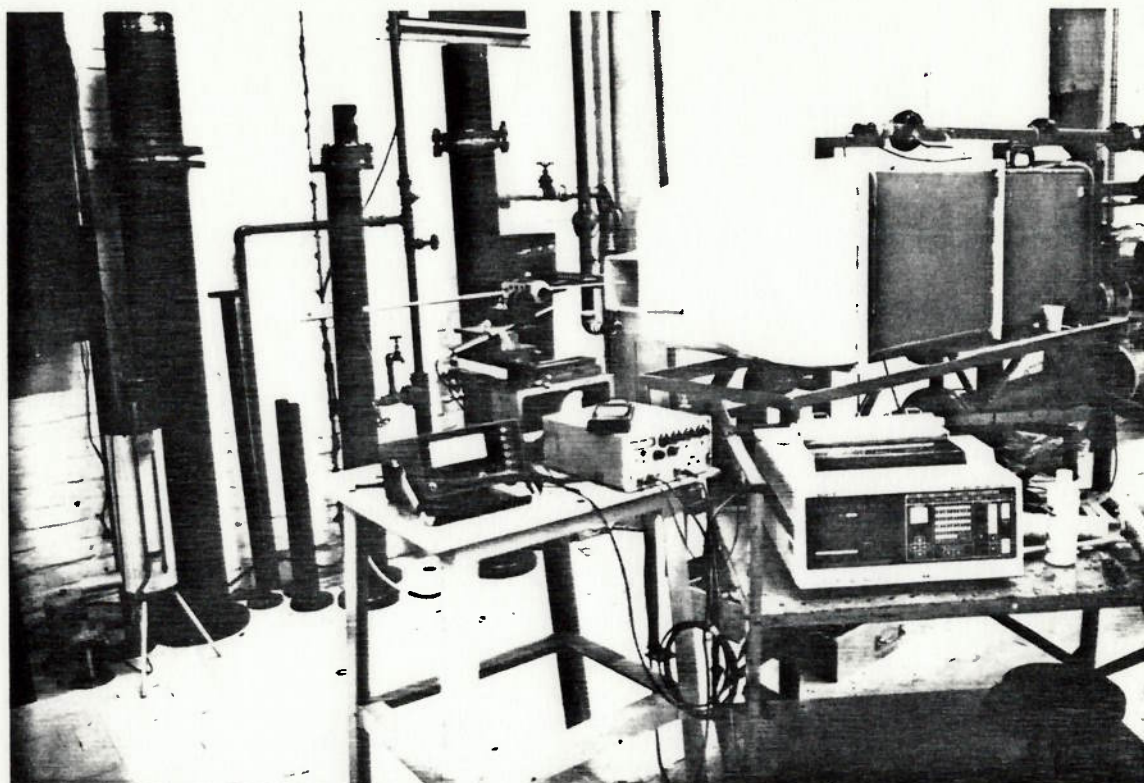


Foto 5 Visão geral da bancada de ensaio. Ao fundo à direita a câmara de ensaio; no centro a sonda e a mesa de coordenadas; à esquerda o manômetro eletrônico e a fonte e ponte da sonda de fio quente; à direita abaixo o analisador de espectro.

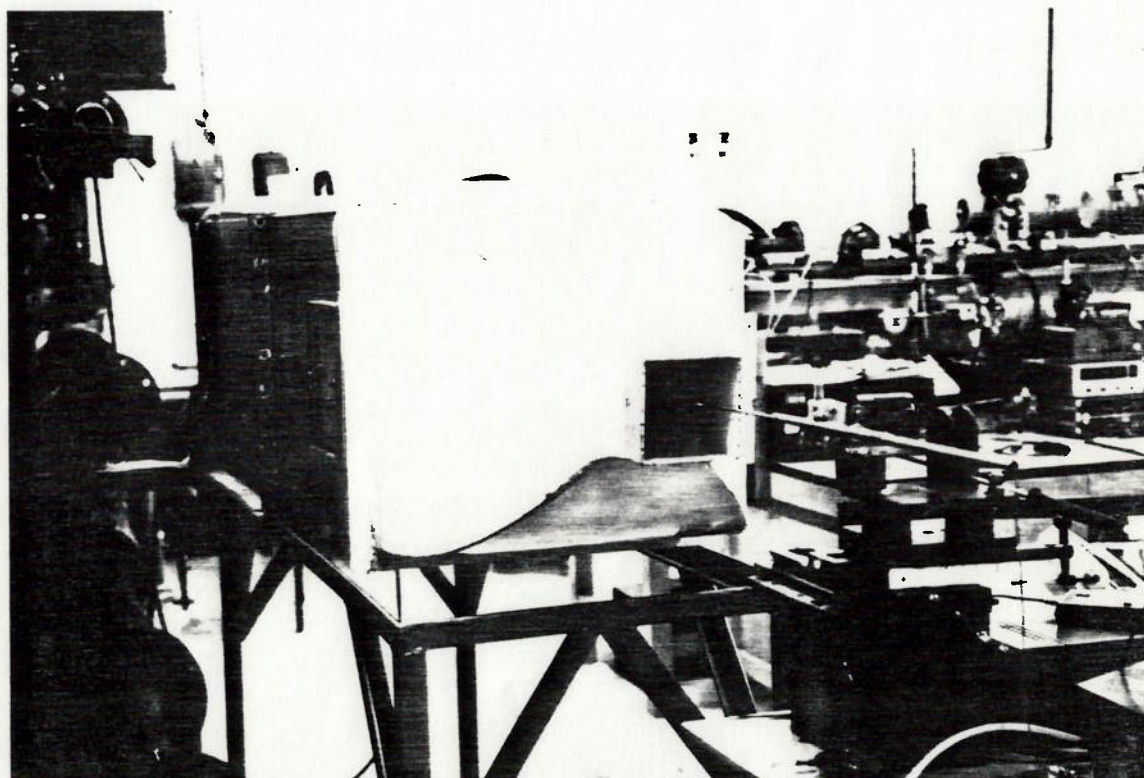


Foto 6 Detalhe da saída da contração. No centro a sonda de fio quente e a mesa de coordenadas com o prolongador para a medição da intensidade de turbulência no eixo longitudinal da contração.

A N E X O D

A N E X O E

ENSAIO No 1

PLANILHA DE ENSAIO DE VERIFICACAO DO PERFIL DE VELOCIDADE NA SAIDA DA CONTRACAO

duracao= 1.2 horas

INICIO			FINAL				
TBS=	21.6	oC	TBS=	22.6	oC		
TBU=	18.25	oC	TBU=	16	oC	rotacao =	1412 rpm set
Patm=	705.4	mmHg	Patm=	704.9	mmHg	vetilador	
Tduto=	21.2	oC	Tduto=	23.3	oC		
k manometro=	33.1559						

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.36	1.1	1.11	1.11	1.11	1.09	1.1	1.09	1.08	1.02	0.13
2	0.37	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.105	1.1	1.105	1.05	0.1
3	1.105	1.095	1.095	1.095	1.09	1.09	1.09	1.095	1.095	1.1	0.95
4	1.11	1.095	1.095	1.095	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.05
5	1.11	1.095	1.095	1.095	1.09	1.09	1.09	1.09	1.095	1.095	1.06
6	1.1	1.1	1.095	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.095	1.09
7	1.1	1.095	1.095	1.095	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.06
8	1.1	1.095	1.095	1.09	1.09	1.09	1.085	1.085	1.09	1.09	1.08
9	1.1	1.09	1.095	1.09	1.09	1.09	1.085	1.09	1.09	1.095	1.06
10	1.11	1.09	1.095	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.095	1.1	1.09
11	1.095	1.09	1.095	1.09	1.09	1.09	1.085	1.085	1.09	1.09	1.04

DISTRIBUICAO DE VELOCIDADE											Umedio=	8.1 m/s
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1		8.1	8.2	8.2	8.2	8.1	8.1	8.1	8.1	7.8		
2		8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.2	8.1	8.2	8.0		
3	8.2	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	7.6	
4	8.2	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.0	
5	8.2	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.0	
6	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	
7	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.0	
8	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	
9	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.0	
10	8.2	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	
11	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	7.9	

DESVIO ABSOLUTO RELATIVO Umedio											0.4 %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0.6	1.0	1.0	1.0	0.1	0.6	0.1	0.4	3.2	
2		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6	0.8	1.8	
3	0.8	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.6	8.6
4	1.0	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.8
5	1.0	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	1.3
6	0.6	0.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1
7	0.6	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.3
8	0.6	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4
9	0.6	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	1.3
10	1.0	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.6	0.1
11		0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	

ENSAIO No 2

PLANILHA DE ENSAIO DE VERIFICACAO DO PERFIL DE VELOCIDADE NA SAIDA DA CONTRACAO

duracao= 1.2 horas

INICIO

TBS= 21.6 oC
 TBU= 18.25 oC
 Patm= 705.4 mmHg
 Tduto= 21.2 oC
 k manometro= 33.1558

FINAL

TBS= 22.6 oC
 TBU= 18 oC
 Patm= 704.9 mmHg
 Tduto= 23.3 oC

rotacao = 1412 rpm set
 ventilador

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.56	1.12	1.125	1.125	1.125	1.095	1.115	1.06	1.06	0.88	0.32
2	1.115	1.115	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.115	1.115
3	1.115	1.115	1.115	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.115	1.115
4	1.115	1.115	1.115	1.11	1.11	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105	1.1
5	1.11	1.105	1.1	1.105	1.1	1.1	1.095	1.1	1.095	1.1	1.1
6	1.11	1.105	1.105	1.105	1.1	1.095	1.095	1.095	1.095	1.1	1.11
7	1.105	1.1	1.095	1.1	1.095	1.09	1.095	1.095	1.095	1.095	1.105
8	1.105	1.1	1.095	1.1	1.095	1.095	1.095	1.095	1.1	1.1	1.105
9	1.105	1.095	1.095	1.095	1.09	1.095	1.095	1.095	1.095	1.1	1.11
10	1.11	1.105	1.11	1.095	1.095	1.1	1.095	1.095	1.095	1.105	1.105
11	0.52	1.105	1.11	1.105	1.105	1.105	1.095	1.095	1.095	1.1	0.35

DISTRIBUICAO DE VELOCIDADE

Umedio= 8.2 m/s

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		8.22	8.24	8.24	8.24	8.12	8.20	7.99	7.99	7.28	
2	8.20	8.20	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.20	8.20
3	8.20	8.20	8.20	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.20	8.20
4	8.20	8.20	8.20	8.18	8.18	8.16	8.16	8.16	8.16	8.16	8.14
5	8.18	8.16	8.14	8.16	8.14	8.14	8.12	8.14	8.12	8.14	8.14
6	8.18	8.16	8.16	8.16	8.14	8.12	8.12	8.12	8.12	8.14	8.18
7	8.16	8.14	8.12	8.14	8.12	8.11	8.12	8.12	8.12	8.12	8.16
8	8.16	8.14	8.12	8.14	8.12	8.12	8.12	8.12	8.14	8.14	8.16
9	8.16	8.12	8.12	8.12	8.11	8.12	8.12	8.12	8.12	8.14	8.18
10	8.18	8.16	8.18	8.12	8.12	8.14	8.12	8.12	8.12	8.16	8.16
11		8.16	8.18	8.16	8.16	8.16	8.12	8.12	8.12	8.14	

DESVIO ABSOLUTO RELATIVO Umedio

0.3 %

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0.8	1.0	1.0	1.0	0.3	0.6	1.9	1.9		
2	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6
3	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6
4	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
5	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.1
6	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.4
7	0.1	0.1	0.3	0.1	0.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1
8	0.1	0.1	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1
9	0.1	0.3	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.4
10	0.4	0.1	0.4	0.3	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1
11		0.1	0.4	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1	

ENSAIO No 3

ENSAIO DE VERIFICACAO DO PERFIL DE VELOCIDADES NO EIXO HORIZONTAL DA SAIDA DA CONTRACAO

TBS= 22.6 °C
 TBU= 18 °C
 Patm= 704.9 mmHg
 Tduto= 23.4 °C
 k manometro= 33.1669

1412 rpm set

	IND.	VELOCIDADE	DESVIO
	MANOMET	(m/s)	ABSOLUTO (%)
1	1.085	8.12	0.2
2	1.085	8.12	0.2
3	1.09	8.11	0.1
4	1.085	8.09	0.1
5	1.085	8.09	0.1
6	1.085	8.09	0.1
7	1.085	8.09	0.1
8	1.085	8.09	0.1
9	1.085	8.09	0.1
10	1.085	8.09	0.1
11	1.085	8.12	0.2

U medio = 8.1 0.16 %

	IND.	VELOCIDA	DESVIO
	MANOMET	(m/s)	ABSOLUTO (%)
1	0.445	5.18	0.8
2	0.44	5.15	0.2
3	0.44	5.15	0.2
4	0.44	5.15	0.2
5	0.44	5.15	0.2
6	0.435	5.12	0.4
7	0.435	5.12	0.4
8	0.435	5.12	0.4
9	0.435	5.12	0.4
10	0.44	5.15	0.2
11	0.44	5.15	0.2

U medio = 5.14 0.32 %

	IND.	VELOCIDADE	DESVIO
	MANOMET	(m/s)	ABSOLUTO (%)
1	0.165	3.15	0.3
2	0.165	3.15	0.3
3	0.165	3.15	0.3
4	0.1625	3.13	0.3
5	0.165	3.15	0.3
6	0.1625	3.13	0.3
7	0.1625	3.13	0.3
8	0.165	3.15	0.3
9	0.1625	3.13	0.3
10	0.165	3.15	0.3
11	0.1625	3.13	0.3

U medio = 3.14 0.32 %

	IND.	VELOCIDA	DESVIO
	MANOMET	(m/s)	ABSOLUTO (%)
1	1.605	9.84	0.1
2	1.605	9.84	0.1
3	1.605	9.84	0.1
4	1.605	9.84	0.1
5	1.6	9.82	0.1
6	1.6	9.82	0.1
7	1.6	9.82	0.1
8	1.6	9.82	0.1
9	1.6	9.82	0.1
10	1.6	9.82	0.1
11	1.61	9.85	0.2

U medio = 9.83 0.11 %

	IND.	VELOCIDADE	DESVIO
	MANOMET	(m/s)	ABSOLUTO (%)
1	6.43	19.69	0.1
2	6.46	19.73	0.2
3	6.46	19.72	0.1
4	6.44	19.70	0.0
5	6.44	19.70	0.0
6	6.43	19.69	0.1
7	6.43	19.69	0.1
8	6.42	19.67	0.2
9	6.42	19.67	0.2
10	6.43	19.69	0.1
11	6.45	19.72	0.1

U medio = 19.7 0.08 %

ENSAIO No. 4

ENSAIO DE VERIFICACAO DO NIVEL DE TURBULENCIA NA CONTRACAO

distancia saida contracao= -5 mm

Data : 01.04.94
 Sonda : AD-35 janela : 10 s
 Tipo : 55P15 Tamb : 21.1 oC
 R20 : 3.896 ohms Rtotal : 4.41 ohms
 sfs20 : 0.4306 %/oC Rtotal : 4.41 ohms
 RL : 0.6 ohms medida
 Patm : 705.1 mmHg A= 2.83025
 n : 2.222 DT : 80 oC B= 1.52851
 motor : 250 rpm Roper : 5.75 ohms

Pto	posicao (mm)	DP pitot (Pa)	E [M]	RMS1 [M]	RMS2 [M]	T_ar [oC]	ro [kg/m3]	U_pitot [m/s]	E^2 [V^2]	U_tio [m/s]	wU [%]	wU [%]
1	0.5	3.5	1.854	0.0027	0.0022	21.1	1.11	2.5	3.44	0.1	3.7	3.0
2	1	3.5	2.223	0.0036	0.0038	21.1	1.11	2.5	4.94	2.1	1.7	1.8
3	2	3.5	2.262	0.0035	0.0030	21.1	1.11	2.5	5.12	2.4	1.5	1.3
4	4	3.5	2.271	0.0034	0.0031	21.1	1.11	2.5	5.16	2.6	1.5	1.3
5	12	3.5	2.268	0.0029	0.0030	21.1	1.11	2.5	5.14	2.6	1.3	1.3
6	24	3.5	2.267	0.0032	0.0029	21.1	1.11	2.5	5.14	2.6	1.4	1.3
7	36	3.5	2.266	0.0033	0.0032	21.1	1.11	2.5	5.13	2.6	1.4	1.4
8	48	3.5	2.264	0.0030	0.0032	21.1	1.11	2.5	5.13	2.6	1.3	1.4
9	60	3.5	2.264	0.0032	0.0030	21.1	1.11	2.5	5.13	2.6	1.4	1.3
10	72	3.5	2.264	0.0028	0.0033	21.1	1.11	2.5	5.13	2.6	1.2	1.4
11	84	3.5	2.264	0.0029	0.0032	21.1	1.11	2.5	5.13	2.6	1.3	1.4
12	96	3.5	2.265	0.0029	0.0032	21.1	1.11	2.5	5.13	2.6	1.3	1.4
13	108	3.5	2.268	0.0035	0.0029	21.1	1.11	2.5	5.14	2.6	1.5	1.2
14	110	3.5	2.264	0.0034	0.0035	21.1	1.11	2.5	5.13	2.6	1.6	1.5
16	114	3.5	2.260	0.0036	0.0030	21.1	1.11	2.5	5.11	2.4	1.6	1.3
17	116	3.5	2.170	0.0034	0.0037	21.1	1.11	2.5	4.71	1.6	1.7	1.9
18	117	3.5	2.052	0.0047	0.0039	21.1	1.11	2.5	4.21	0.8	3.1	2.6
19	117.5	3.5	1.985	0.0039	0.0043	21.1	1.11	2.5	3.94	0.5	3.1	3.4

VERIFICACAO DE NO NIVEL DE TURBULENCIA NO EDXO DE SIMETRIA DA CONTRACAO

Pto	posicao (mm)	DP pitot (Pa)	E [M]	RMS1 [M]	RMS2 [M]	T_ar [oC]	ro [kg/m3]	U_pitot [m/s]	E^2 [V^2]	U_tio [m/s]	wU [%]	wU [%]
0	0	3.5	2.258	0.0029	0.0030	21.1	1.11	2.5	5.10	2.4	1.3	1.3
1	-30		2.252	0.0031	0.0030	21.1	1.11		5.07	2.3	1.4	1.3
2	-60		2.240	0.0033	0.0030	21.1	1.11		5.02	2.2	1.5	1.4
3	-90		2.215	0.0029	0.0026	21.1	1.11		4.91	2.0	1.4	1.3
4	-120		2.170	0.0034	0.0032	21.1	1.11		4.71	1.6	1.7	1.6
5	-150		2.104	0.0030	0.0028	21.1	1.11		4.43	1.1	1.7	1.6
6	-180		2.041	0.0027	0.0027	21.1	1.11		4.17	0.7	1.8	1.8
7	-210		1.988	0.0028	0.0026	21.1	1.11		3.95	0.5	2.2	2.1
8	-240		1.945	0.0024	0.0024	21.1	1.11		3.78	0.3	2.2	2.1
9	-270		1.914	0.0025	0.0025	21.1	1.11		3.66	0.3	2.6	2.6
10	-300		1.892	0.0024	0.0025	21.1	1.11		3.58	0.2	2.7	2.8
11	-330		1.876	0.0028	0.0023	21.1	1.11		3.62	0.2	3.3	2.7
12	-360		1.864	0.0023	0.0028	21.1	1.11		3.47	0.1	2.9	3.6
13	-390		1.855	0.0024	0.0022	21.1	1.11		3.44	0.1	3.2	3.0
14	-420		1.847	0.0023	0.0023	21.1	1.11		3.41	0.1	3.2	3.2
15	-450		1.844	0.0021	0.0024	21.1	1.11		3.40	0.1	3.1	3.5
16	-480		1.840	0.0021	0.0026	21.1	1.11		3.39	0.1	3.1	3.8
		origem	2.255	0.0030	0.0027	21.1	1.11		5.09	2.4	1.3	1.2

ENSAIO No. 5

ENSAIO DE VERIFICACAO DO NIVEL DE TURBULENCIA NA CONTRACAO

distancia saida contracao= -5 mm

Data : 01.04.94
 Sonda : AD-36 janela : 10 s
 Tipo : 55P16 Tamb : 21.1 oC
 R20 : 3.896 ohms Rtota : 4.41 ohms
 alfa20 : 0.4305 %/oC Rtota : 4.41 ohms
 RL : 0.6 ohms medida
 Patm : 705.1 mmHg A= 2.89025
 n : 2.2222 DT : 80 oC B= 1.52851
 rmotor : 250 rpm Roper : 5.75 ohms

Pto	posicao (mm)	DP pitot (Pa)	E [V]	RMS1 [V]	RMS2 [V]	T_ar [oC]	ro [kg/m3]	Uptot [m/s]	E^2 [V^2]	Uto [m/s]	w/U [%]	w/U [%]
0	0	58.5										
1	0.5	58.5	2.603	0.0374	0.0380	22.4	1.10	10.3	6.27	6.0	12.1	12.3
2	1	58.5	2.663	0.0154	0.0153	22.4	1.10	10.3	7.09	9.8	4.3	4.3
3	2	58.5	2.698	0.0044	0.0047	22.4	1.10	10.3	7.28	10.7	1.2	1.3
4	4	58.5	2.698	0.0039	0.0034	22.4	1.10	10.3	7.28	10.7	1.0	0.9
5	12	58.5	2.697	0.0038	0.0035	22.4	1.10	10.3	7.27	10.7	1.0	1.0
6	24	58.5	2.693	0.0040	0.0035	22.4	1.10	10.3	7.25	10.6	1.1	0.9
7	36	58.5	2.691	0.0039	0.0037	22.4	1.10	10.3	7.24	10.6	1.0	1.0
8	48	58.5	2.689	0.0036	0.0039	22.4	1.10	10.3	7.23	10.6	1.0	1.0
9	60	58.5	2.689	0.0038	0.0036	22.4	1.10	10.3	7.23	10.6	1.0	1.0
10	72	58.5	2.688	0.0039	0.0037	22.4	1.10	10.3	7.23	10.6	1.0	1.0
11	84	58.5	2.690	0.0037	0.0035	22.4	1.10	10.3	7.24	10.6	1.0	0.9
12	96	58.5	2.690	0.0038	0.0037	22.4	1.10	10.3	7.24	10.6	1.0	1.0
13	108	58.5	2.694	0.0032	0.0037	22.4	1.10	10.3	7.26	10.6	0.9	1.0
14	110	58.5	2.695	0.0038	0.0037	22.4	1.10	10.3	7.26	10.7	1.0	1.0
16	114	58.5	2.695	0.0036	0.0038	22.4	1.10	10.3	7.26	10.7	1.0	1.0
17	116	58.5	2.638	0.0117	0.0113	22.4	1.10	10.3	6.96	9.1	3.3	3.2
18	117	58.5	2.442	0.0344	0.0393	22.4	1.10	10.3	5.96	4.9	11.9	13.6
19	117.5	58.5	2.391	0.0418	0.0408	22.4	1.10	10.3	5.72	4.1	15.4	16.0

VERIFICACAO DE NO NIVEL DE TURBULENCIA NO EDXO DE SIMETRIA DA CONTRACAO

Pto	posicao (mm)	DP pitot (Pa)	E [V]	RMS1 [V]	RMS2 [V]	T_ar [oC]	ro [kg/m3]	Uptot [m/s]	E^2 [V^2]	Uto [m/s]	w/U [%]	w/U [%]
0	0	59.5	2.681	0.0039	0.0038	23.1	1.10	10.4	7.19	10.3	1.1	1.1
1	-30		2.673	0.0035	0.0039	23.1	1.10		7.14	10.0	1.0	1.1
2	-60		2.662	0.0039	0.0038	23.1	1.10		7.03	9.5	1.1	1.1
3	-90		2.616	0.0041	0.0037	23.1	1.10		6.84	8.5	1.2	1.1
4	-120		2.548	0.0036	0.0038	23.1	1.10		6.49	7.0	1.1	1.2
5	-150		2.452	0.0048	0.0042	23.1	1.10		6.01	5.1	1.6	1.5
6	-180		2.348	0.0038	0.0034	23.1	1.10		5.51	3.5	1.5	1.3
7	-210		2.261	0.0039	0.0035	23.1	1.10		5.11	2.4	1.7	1.6
8	-240		2.193	0.0033	0.0037	23.1	1.10		4.81	1.8	1.6	1.8
9	-270		2.140	0.0033	0.0035	23.1	1.10		4.58	1.3	1.8	1.9
10	-300		2.101	0.0038	0.0035	23.1	1.10		4.41	1.1	2.3	2.0
11	-330		2.068	0.0034	0.0032	23.1	1.10		4.28	0.9	2.2	2.1
12	-360		2.046	0.0034	0.0034	23.1	1.10		4.19	0.8	2.3	2.3
13	-390		2.029	0.0031	0.0036	23.1	1.10		4.12	0.7	2.2	2.5
14	-420		2.017	0.0032	0.0032	23.1	1.10		4.07	0.6	2.3	2.3
16	-450		2.006	0.0032	0.0032	23.1	1.10		4.02	0.6	2.4	2.4
16	-480		1.995	0.0031	0.0033	23.1	1.10		3.98	0.5	2.4	2.6
	origem		2.255	0.0030	0.0027	21.1	1.11		5.09	2.4	1.3	1.2

ANEXO F

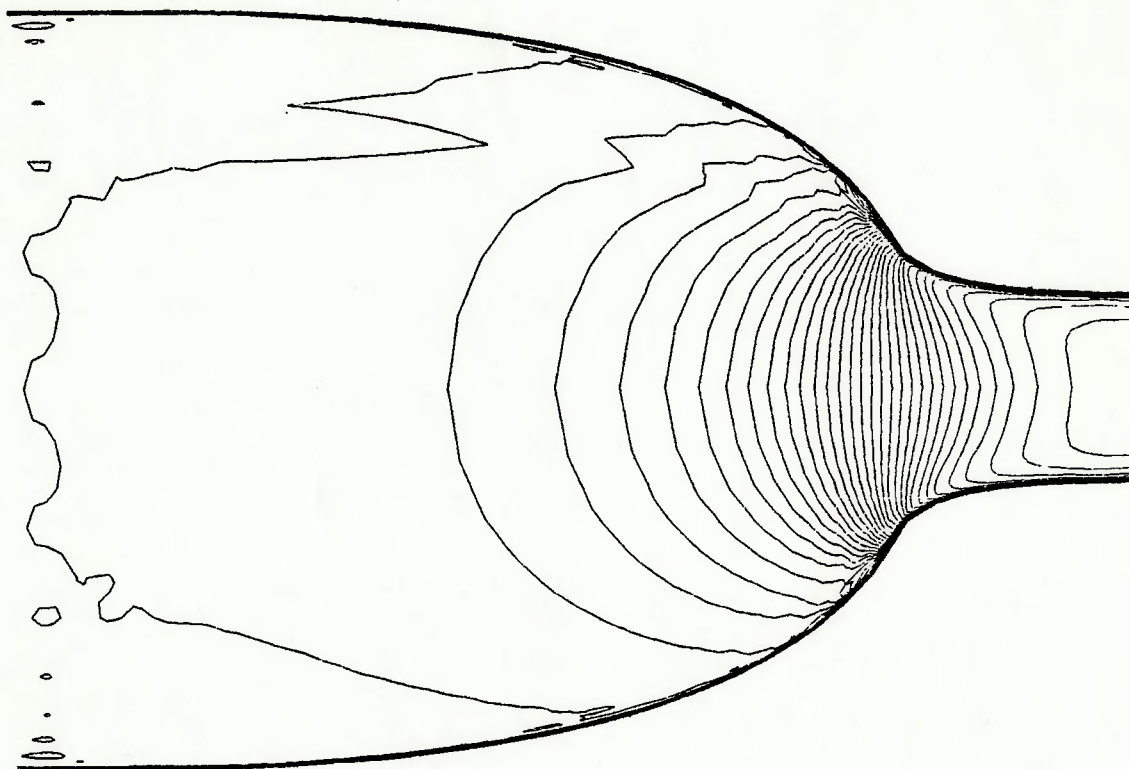


Figura F.1 Distribuição das linhas de iso-velocidades para a contração de Whitehead quando submetida a uma não uniformidade do perfil de velocidade de entrada

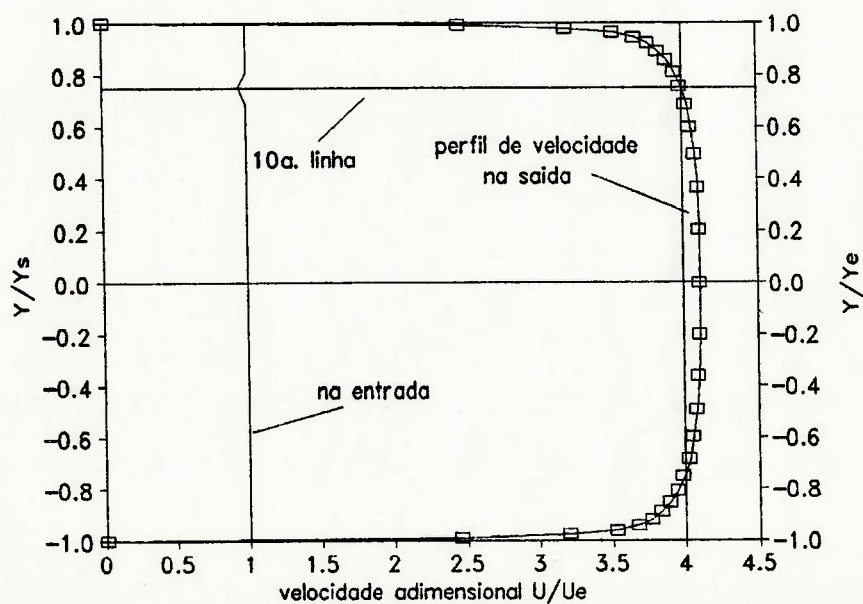


Figura F.2 Perfil de velocidade na saída da contração de Whitehead, quando submetida a uma não uniformidade do perfil de velocidade de entrada

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) ALGOR INTERACTIVE SYSTEMS. *Fluid flow system*. Pittsburg, 1990.
- 2) BATILL, S.T.; HOFFMAN, J.J. Aerodynamic design of three-dimensional wind tunnel inlets. *J. AIAA*, v.24, n.2, Feb. 1986.
- 3) BEARMAN, P.W. Corrections for the Effect of Ambient Temperature Drift on Hot Wire Measurements in Incompressible Flow, *Disa information*, n. 11, May 1971.
- 4) BELL, J.H.; MEHTA, R.D. Boundary layer predictions for small low-speed contractions. *J. AIAA*, v.27, n.3, March 1989.
- 5) BORGER, G.G. *The optimization of wind tunnel contractions of the subsonic range*. Washington: NASA, March 1976. (NASA TTF 16899)
- 6) BOSSEL, H.H. Computation of axisymmetric contractions. *J. AIAA*, v.7, n.10, Oct. 1969.
- 7) BRADSHAW, P. *Simple wind tunnel design*. London: NPL, March 1968. (NPL AERO Rep. 1258)
- 8) BRADSHAW, P.; PANKHURST, R.C. *The design of low speed wind tunnels*. London: NPL, Sept. 1962. (NPL Aero Report 1039)
- 9) BRADSHAW, P. *A low-turbulence wind tunnel driven by a centrifugal blower*. London: NPL, October 1965. (NPL AERO Rep. 1171)
- 10) CHMIELEWSKI, G. E. Boundary layer considerations in the design of aerodynamic contractions. *J. aircraft*, v.11, n.8, August 1974.
- 11) COHEN, M.J.; RITCHIE, N.J.B. Low speed three-dimensional contraction design. *J. of Royal Aeronautical Soc.*, v.66, n.616, April 1962.
- 12) COMTE-BELLOT, G.; CORRSIN, S. The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence. *J. fluid mech.*, v.25, part 4, 1966.
- 13) CRAWFORD, M.E; KAYS, W.M. *STAN5: A program for numerical computation of two-dimensional internal and external boundary layer flows*. Washington: NASA, Dec. 1976. (NASA CR-2742)

- 14) GALEA, P.V. *Development and calibration of a low speed demonstration wind tunnel*. London: NPL, May 1967. (NPL AERO Note 1058, London Arc 29130)
- 15) GERHART, P.M.; GROSS, R.J. *Fundamentals of fluid mechanics*. s.l.p: Addison-Wesley, 1985.
- 16) HUSSAIN, A.K.M.F.; RAMJEE, V. Effects of axisymmetric contraction shape on incompressible turbulent flow. *J. fluids eng.*, p. 58-69, v.98, n.1, March 1976.
- 17) JORDINSON, R. Design of wind tunnel contractions. *Aircraft eng.*, Oct. 1961.
- 18) LAU, W.T.F. An analytical method for design of two-dimensional contractions. *J. of Royal Aeronautical Soc.*, v.68, n.637, April 1964.
- 19) MIKHAIL, M.N.; RAINBIRD, W.J. Optimum design of wind tunnel contractions. In: *AIAA Aerodynamic testing Conference, 10*, p. 376-384, 1978. (AIAA Paper 78-819)
- 20) MOREL, T. Comprehensive design of axisymmetric wind tunnel contraction. *J. fluid mech.*, v.97, n.2, June 1975.
- 21) MOREL, T. Design of two-dimensional wind tunnel contractions. *J. fluid eng.*, June 1977.
- 22) PANTON, R.L. *Incompressible flow*. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- 23) PERRY, A. E. *Hot wire anemometry*. Oxford: Clarendon Press, 1982.
- 24) POPE, A.; HARPER, J.J. *Low-speed wind tunnel testing*. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- 25) RAMJEE, V.; HUSSAIN, A.K.M.F. Influence of the axisymmetric contraction ratio on free-stream turbulence. *J. fluids eng.*, p. 506-515, v.98, n.3, Sept. 1976.
- 26) ROUSE, H.; HASSAN, M.N. Cavitation-free inlets and contractions. *Mechanical eng.*, March 1949.
- 27) SALTER, C. *Low speed wind tunnels for special purposes*. London: NPL, Dec. 1966. (NPL AERO Rept. 1218)
- 28) STRATFORD, B.S. The prediction of separation of the turbulent boundary layer, *J. fluid mech.*, v. 5, p.1-16, 1959.

- 29) SU, Y. Flow analysis and design of three-dimensional wind tunnel contractions. *J. AIAA*, v.29, n.11, Nov. 1991.
- 30) TULAPURKARA, E.G.; BHALLA, V.V.K. Experimental investigation of Morel's methods for wind tunnel contractions. *J. fluid eng.*, v.110, March 1988.
- 31) WATTS, K.C. et al. Design and construction of a wind tunnel for mass transfer studies in incompressible boundary layers. *J. fluids eng.*, Dec. 1974.
- 32) WHITE, F.M. *Viscous fluid flow*. New York: Mc Graw-Hill, 1974.
- 33) WHITEHEAD, L.G.; WU, L.Y.; WATERS, M.H.L. Contraciton ducts of finite lenght. *The Aeronautical quarterly*, v.2, Feb. 1951.
- 34) WILLS, J.A.B. *Hot wire and hot film anemometry*, Oxford: Clarendon Press, 1980.
- 35) WILLS, J.A.B. *Wind Tunnel*. s.n.t. (private communication of British Maritime Technology)

APÊNDICE A

METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE CONTRAÇÃO SEGUNDO WHITEHEAD

A.1 Desenvolvimento do método bidimensional para as contrações de túneis de vento

A contração em um túnel de vento deve ser resultante de um compromisso entre a necessidade de fazê-la em um espaço (comprimento) relativamente curto e a necessidade de reduzir efeitos de descolamento da camada limite, resultantes de gradientes adversos de pressão. Na Figura A.1 a contração é ilustrada indicando-se os pontos principais. Em A o escoamento é sensivelmente uniforme, começando a ser perturbado pela presença da contração. A parede é representada pela linha de corrente ABCDE. Ao longo dessa linha de corrente o escoamento se processa da seguinte forma:

AB - velocidade é reduzida, aumento de pressão

BC - aumento significativo de velocidade até valor superior a $U.k$

CD - mudança de direção, sem entretanto verificar-se variação no valor absoluto da velocidade

DE - desaceleração até $U.k$, com gradiente adverso de pressão

onde:

U é a velocidade de entrada na contração;

k é relação de contração para o caso bidimensional,

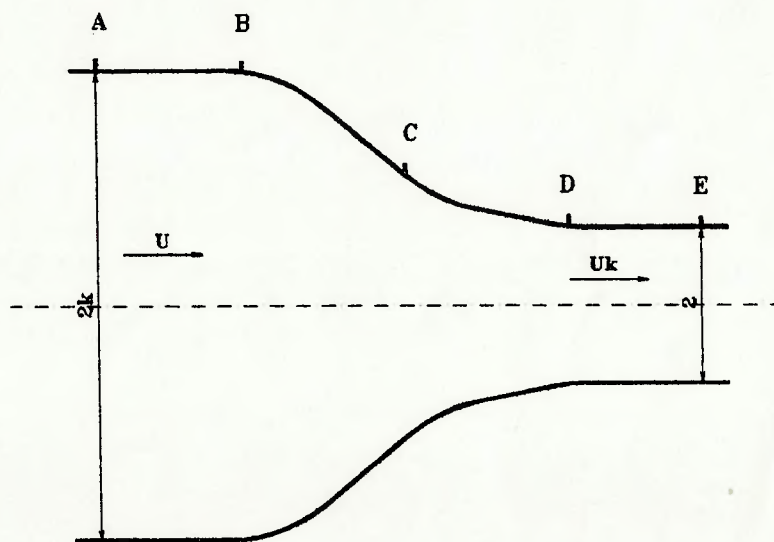


Figura A.1 Região de contração do túnel de vento

Algumas hipóteses foram feitas no esquema acima descrito, além daquela de desprezar o efeito da camada limite, que é uma hipótese básica deste assunto. Se o escoamento acima for descrito no plano do hodógrafo ter-se-á o diagrama apresentado na Figura A.2.

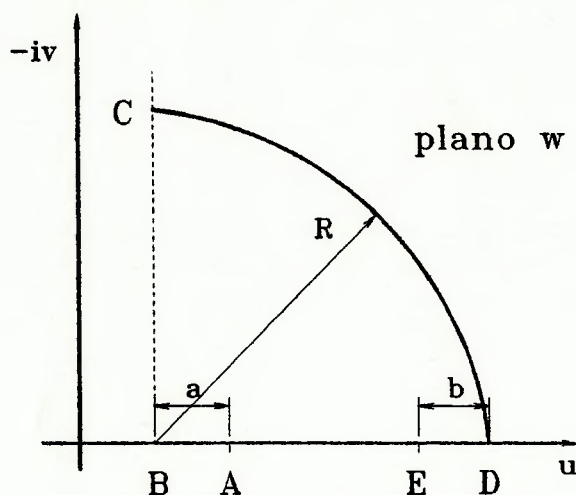


Figura A.2 Hodógrafo para a linha de corrente ABCDE da Figura A.1

Pela Figura A.2 observa-se que no ponto A existe uma fonte (singularidade da teoria de escoamento potencial) que possui intensidade $2Uk$, o mesmo ocorrendo no ponto E, logo:

- Quanto mais longa for a distância AB, menor será o gradiente de pressões e, portanto, menor será a distância \underline{a} no hodógrafo (ou, em outras palavras, menor será a diferença entre as velocidades em A e B). Para a região DE podem ser usados argumentos análogos;
- Observa-se que variando-se a linha de corrente, ou seja, escolhendo um outro contorno da parede, os gradientes de pressão entre pontos correspondentes a A e B podem ser alterados. Assim, uma linha de corrente, situada entre a linha indicada (contorno da parede) na Figura A.1 e a linha de centro, apresentará valores de \underline{a} e \underline{b} inferiores. A consequência direta para esta situação é um maior comprimento da contração;
- Os valores de \underline{a} e de \underline{b} fixam, portanto, a geometria da linha de corrente e, conseqüentemente, a geometria da parede;
- O raio do arco de círculo no hodógrafo pode ser calculado como segue:

$$R = Uk + a + b - U$$

e) Se a função POTENCIAL COMPLEXO for designada por Ω , tal que,

$$\Omega = \Phi + i\psi$$

então

$$d\Omega/dz = u - iv = w$$

resultando o plano w do hodógrafo.

f) No plano complexo do hodógrafo, plano w , a linha ABCDE é uma linha de corrente. Assim, se nesse plano a função Ω for representada por:

$$\Omega = \alpha + i\beta$$

ao longo de ABCDE, β é constante.

g) A fim de operar com um raio unitário para o arco de círculo e posicionar o seu centro na origem do plano complexo, as seguintes transformações devem ser feitas:

- adimensionalizar as velocidades: $u^* = u/U$ e $v^* = v/U$
- a e b serão considerados adimensionais
- o raio adimensional do arco de círculo será igual a $R^* = k + a + b - 1$
- $w_1 = w/U$ e $w^* = (w_1 + a - 1)/R^*$

O novo plano do hodógrafo, plano w^* , terá o aspecto indicado na Figura A.3, com raio do arco de círculo unitário.

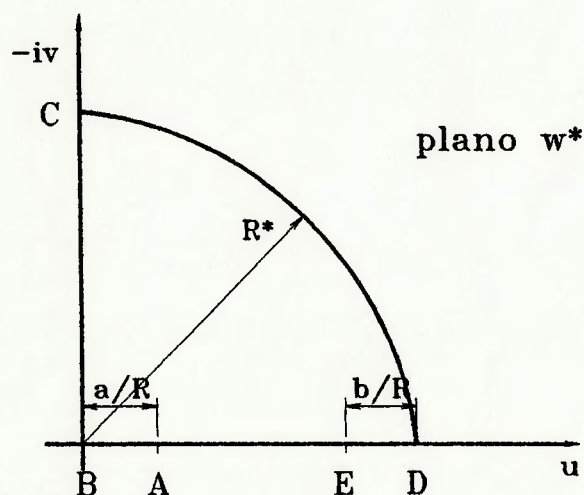


Figura A.3 Plano do hodógrafo transformado

h) A fim de simplificar a notação, os asteriscos dos parâmetros adimensionais serão retirados, amenos que haja risco de confusão de parâmetros. Nessas condições u , v , R , w representarão parâmetros adimensionais.

O hodógrafo adimensional pode ser obtido da equação:

$$\frac{1}{U} \frac{d\Omega}{dz} = u - i v = w_1 \quad (\text{A.1})$$

$$w_1 = f(z) = u - i v$$

$$\Omega = F(z) = \Phi(x,y) + i \Psi(x,y)$$

No plano do hodógrafo, $\Omega = \Omega(w_1)$, de tal modo que

$$\frac{d\Omega}{dw_1} = \frac{d\Omega}{dz} \frac{dz}{dw_1} = \frac{F'(z)}{f(z)} \quad (\text{A.2})$$

como $F'(z)$ e $f(z)$ são analíticas, resulta que $\Omega(w_1)$ também é analítica. Assim, o objetivo é obter a função potencial em termos da variável complexa w_1 , ou w . Para isso o plano do hodógrafo passa a ser o plano de trabalho, com "funções potenciais" e linhas de "corrente". A linha ABCDE do plano do hodógrafo é uma "linha de corrente", tal que se

$$\Omega = \alpha + i \beta$$

ao longo dessa linha,

$$d\Omega = d\alpha$$

Resumindo, o problema foi totalmente transportado para o hodógrafo. O problema se resume em determinar o escoamento no interior de um arco de círculo contendo uma fonte em A e um sorvedouro em E. Devido ao escoamento ao longo da linha BC (sempre no plano hodógrafo), a solução pelo método das imagens é recomendável, como indicado na Figura A.4.

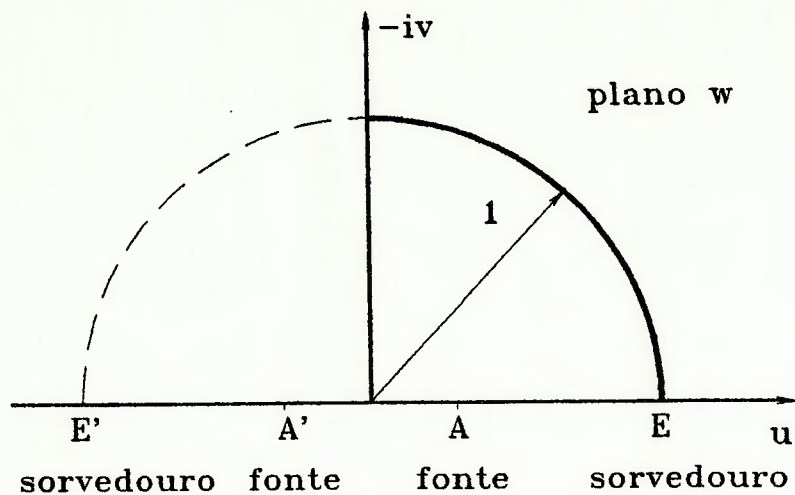


Figura A.4 Esquema do método das imagens para a solução do problema

O procedimento é o seguinte:

- a) Fonte em A e sua reflexão no círculo

Neste caso será aplicado o Teorema do Círculo, resultando,

$$\Omega_A = \frac{\lambda}{2\pi} \left[\ln \left(w - \frac{a}{R} \right) + \ln \left(w - \frac{R}{a} \right) \right] - \frac{\lambda}{2\pi} \ln z$$

onde λ é a intensidade que é igual a $2Uk$ e $1/(a/R)$ corresponde a b^2/m .

- b) Sorvedouro em E e sua reflexão no círculo

Analogamente ao caso anterior.

$$\Omega_s = -\frac{\lambda}{2\pi} \left[\ln \left(w - \frac{R-b}{R} \right) + \ln \left(w - \frac{R}{R-b} \right) \right] - \frac{\lambda}{2\pi} \ln z$$

c) Fonte imagem em A' e a reflexão no círculo imagem

$$\Omega_{A'} = \frac{\lambda}{2\pi} \left[\ln \left(w + \frac{a}{R} \right) + \ln \left(w + \frac{R}{a} \right) \right] - \frac{\lambda}{2\pi} \ln z$$

d) Sorvedouro imagem em E' e reflexão no círculo imagem

$$\Omega_{E'} = -\frac{\lambda}{2\pi} \left[\ln \left(w + \frac{R-b}{R} \right) + \ln \left(w + \frac{R}{R-b} \right) \right] - \frac{\lambda}{2\pi} \ln z$$

Como o princípio da superposição de soluções é válido, então

$$\Omega = \Omega_A + \Omega_{A'} + \Omega_E + \Omega_{E'}$$

$$\Omega = \frac{\lambda}{2\pi} \ln \left[\frac{(w^2 - a^2/R^2)(w^2 - R^2/a^2)}{(w^2 - (R-b)^2/R^2)(w^2 - R^2/(R-b)^2)} \right]$$

Introduzindo o valor da intensidade ($\lambda=2Uk$), resulta finalmente:

$$\Omega = \frac{Uk}{\pi} \ln \left[\frac{(w^2 - a^2/R^2)(w^2 - R^2/a^2)}{(w^2 - (R-b)^2/R^2)(w^2 - R^2/(R-b)^2)} \right] \quad (\text{A.3})$$

O objetivo agora é voltar ao plano z , a partir da equação acima, com o que resultam as linhas equipotenciais e as linhas de corrente. Destas só há interesse na particular que representa a parede ABCDE. Para "voltar" basta considerar que

$$\frac{1}{U} \frac{d\Omega}{dz} = w_1 \quad dz = \frac{1}{U} \frac{d\Omega}{w_1}$$

como a integração se dá ao longo da linha de corrente no plano w , então $dW=da$; logo,

$$dz = \frac{1}{U} \frac{d\alpha}{u - iv} = \frac{1}{U} \frac{u + iv}{(u - iv)(u + iv)} d\alpha$$

ou melhor,

$$dz = \frac{1}{U} \left[\frac{u}{u^2 + v^2} d\alpha + i \frac{v}{u^2 + v^2} d\alpha \right]$$

Como $z=x+iy$, identificando-se os dois membros,

$$x = \frac{1}{U} \int \frac{u}{u^2 + v^2} d\alpha + Cx \quad y = \frac{1}{U} \int \frac{v}{u^2 + v^2} d\alpha + Cy \quad (\text{A.4})$$

Resta então integrar as equações acima. Entretanto, o problema não é tão simples como parece. O procedimento geral consiste:

- a) definir $\Delta\alpha$ ($\Delta\Omega$)
- b) determinar, a partir de a conhecido, o valor de w_1 e, portanto u e v
- c) definir um algoritmo de integração

É conveniente desenvolver o assunto por partes. A primeira parte diz respeito à determinação de w_1 a partir de um dado valor de Ω (ou α). Para isso, considerando a equação A.3 e transformando-a, tal que:

$$e^M = \left[\frac{(w^2 - a^2 / R^2)(w^2 - R^2 / a^2)}{(w^2 - (R-b)^2 / R^2)(w^2 - R^2 / (R-b)^2)} \right] \quad (\text{A.5})$$

onde : $M = \frac{\Omega\pi}{Uk}$

$$(w^2 - a^2 / R^2)(w^2 - R^2 / a^2) = w^4 - \delta \cdot w^2 + 1$$

onde : $\delta = \left(\frac{R^2}{a^2} + \frac{a^2}{R^2} \right) \quad (\text{A.6})$

$$\left[(w^2 - (R-b)^2 / R^2) \right] \cdot \left[(w^2 - R^2 / (R-b)^2) \right] = w^4 - \gamma \cdot w^2 + 1$$

onde : $\gamma = \left[\frac{(R-b)^2}{R^2} + \frac{R^2}{(R-b)^2} \right] \quad (\text{A.7})$

Substituindo as equações 5.6 e 5.7 na equação 5.5 e simplificando a equação resultante, obtém-se:

$$w^4 - \frac{\gamma \cdot M - \delta}{M - 1} \cdot w^2 + 1 = 0$$

fazendo $\theta = \frac{\gamma \cdot M - \delta}{M - 1}$ (A.8)

A solução da equação quadrática pode ser facilmente obtida:

$$w^4 - \frac{1}{2^{0.5}} \left[\theta \pm (\theta - 4)^{0.5} \right]^{0.5} \quad (\text{A.9})$$

No artigo de Whitehead a equação A.9 é melhor trabalhada:

$$\sqrt{2} \cdot w = \pm \left[\theta \pm (\theta + 2)^{0.5} (\theta - 2)^{0.5} \right]^{0.5}$$

se $\theta = 2(\mu + iv)$, então:

$$\sqrt{2} \cdot w = \pm \left[2(\mu + iv) \pm \left[2(\mu + iv + 1) \right]^{0.5} \left[2(\mu + iv - 1) \right]^{0.5} \right]^{0.5}$$

desenvolvendo e fazendo $a = (\mu + iv + 1)$ e $b = (\mu + iv - 1)$

$$\sqrt{2} \cdot w = \pm \left[a^2 + b^2 \pm 2ab \right]^{0.5} = \pm \left[a^2 \pm b^2 \right]^{0.5} = \pm \left[a \pm b \right]$$

portanto

$$\sqrt{2} \cdot w = \pm (\mu + iv + 1)^{0.5} \pm (\mu + iv - 1)^{0.5} \quad (\text{A.10})$$

A seguir será visto qual a característica de θ ao longo da linha de corrente (no plano do hodógrafo) ABCDE, sendo γ e δ números reais.

como $M = \frac{\Omega \pi}{Uk}$; portanto Ω decidirá quanto a M.

Em AB - w real e positivo $\Rightarrow \Omega$ real \Rightarrow M real
 Em BC - w complexo puro $\Rightarrow w^2 < 0$ $\Rightarrow \Omega$ real \Rightarrow M real
 Em CD - analogamente M real
 Em DE - analogamente M real

Assim Y é real ao longo da linha de corrente, com o que $n=0$ e a equação A.10 fica:

$$\theta = 2\mu \Rightarrow 2\theta$$

a partir de γ , δ e Ω

$$w = \pm \left[\frac{\mu+1}{2} \right]^{0.5} \pm \left[\frac{\mu-1}{2} \right]^{0.5} \quad (\text{A.11})$$

Whitehead & Waters (37) sugerem que a integração das equações se de a partir de C, definindo-se o intervalo $\Delta\alpha$ a partir dos valores de $(\alpha_C - \alpha_B)$ e $(\alpha_D - \alpha_C)$. Essas diferenças são facilmente avaliadas, se for considerado que:

em C $w=i \Rightarrow$

$$\alpha_c = \frac{Uk}{\pi} \ln \left[\frac{(R^2 + a^2)(R^2 + a^2)(k+a-1)^2}{[R^2 + (k+a-1)][R^2 + (k+a-1)^2]a^2} \right]$$

na expressão acima o valor de $R-b$ foi substituído por $(k+a-1)$, uma vez que $R=k+a+b-1$

em B $w=0 \Rightarrow \alpha_c = \frac{Uk}{\pi} = 0$

Logo,

$$\alpha_c - \alpha_b = \frac{Uk}{\pi} 2 \ln \left[\frac{(R^2 + a^2)(k+a-1)^2}{aR^2 + (k+a-1)^2} \right]$$

em D $w=i \Rightarrow$

$$\alpha_D = \frac{Uk}{\pi} \ln \left[\frac{(R^2 + a^2)(R^2 + a^2)(k + a - 1)^2}{[R^2 - (k + a - 1)][(k + a - 1)^2 - R^2]a^2} \right]$$

Assim,

$$\begin{aligned} \alpha_D - \alpha_C &= \frac{Uk}{\pi} \ln \left[\frac{(R^2 + a^2)^2 [R^2 - a(k + a - 1)^2]^2}{[R^2 + (k + a - 1)^2]^2 [R^2 - a^2]^2} \right] \\ &= \frac{Uk}{\pi} 2 \ln \left[\frac{(R^2 + a^2)^2 [R^2 - a(k + a - 1)^2]^2}{[R^2 + (k + a - 1)^2]^2 [R^2 - a^2]^2} \right] \end{aligned}$$

O valor de $\Delta\alpha$ nos trechos BC e CD é determinado definindo-se o número de pontos que se deseja avaliar do contorno, assim

$$\Delta_{BC} = (\alpha_C - \alpha_B) / N_{BC}$$

$$\Delta_{CD} = (\alpha_D - \alpha_C) / N_{CD}$$

onde N_{BC} e N_{CD} são, respectivamente, o número de pontos do contorno BC e CD que se deseja calcular. Assim, com os valores de $\Delta\alpha$ definidos e a equação de determinação de w a partir de a , equação A.11, as equações A.4 podem ser integradas. Para determinar u e v , deve-se proceder da seguinte forma

- a) $\alpha_1 = \alpha_C$
- b) $\alpha_2 = \alpha_C + \Delta\alpha$ e assim por diante
- c) dado α , pela equação A.11 obtém-se w
- d) $w_1 = wR + 1 - a$
- e) $w_1 = u - iv \Rightarrow u$ e v para o valor de a dado

A.2 Cálculo do contorno da contração

Como pode ser visto no item anterior, foi apresentada a discretização do método adotado para a obtenção do contorno da contração. Assim sendo, pode-se desenvolver um programa de computador para a solução do problema proposto, tendo como entrada os seguinte dados:

- a) relação de contração k^2
- b) coeficiente de pressão à montante da contração a .

É um valor adimensional, que pode ser entendido ao se aplicar a equação de Bernoulli entre o trecho AB, como segue:

$$\rho \frac{V_A^2}{2} + P_A = \rho \frac{V_B^2}{2} + P_B$$

como $V_A=U$ (velocidade na entrada da contração) e adimensionalizando a equação, em termos de U^2

$$1 + \frac{P_A}{\rho U^2 / 2} = \frac{P_B}{\rho U^2 / 2} + \left[\frac{V_B}{U} \right]^2$$

fazendo

$$p_A = \frac{P_A}{\rho U^2 / 2} \quad p_B = \frac{P_B}{\rho U^2 / 2}$$

logo obtém-se

$$a = 1 - \frac{V_B^2}{U^2} \quad (\text{A.12})$$

Quanto maior o valor de $(P_B - P_A)$ maior será o valor de a , isto é maior será distância entre os pontos A e B no plano hodógrafo. No plano z , o aumento de a corresponde a uma aproximação dos pontos A e B.

- c) coeficiente de pressão à jusante da contração b

O conceito é semelhante ao de a , porém neste caso os pontos D e E estão envolvidos.

- d) dimensões desejadas para entrada e saída da contração

A.2.1 CONTRAC - Programa de computador para dimensionamento do contorno da contração

O programa de computador foi desenvolvido na linguagem Pascal para microcomputadores e apresenta a seguinte listagem:

```
program CONTRAC;  
uses crt,printer,diversos;
```

```
{ WHITEHEAD, WU & WATERS CONTRACTION DESIGN (AERO.QUART. II, Feb., 1951)
```

Calcula uma forma de contração 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 contração.

Whitehead, Wu & Waters descobriram que uma contração, axialmente simétrica, baseada nesta forma (i.e. tendo uma razão de contração k quadrada) tem uma distribuição de pressões levemente melhor que a forma bidimensional. Assim, é usual calcular uma contração bidimensional de razão k, mas usa-la como uma contração retangular cuja distribuição de área e a que corresponde a contração axialmente simétrica de k quadrada. }

```
const Limite=100;  
type Matriz = array[0..Limite] of real;  
var u,v,w,y,z,a,b,c,d,e,f,g,gf,sum : real;  
    item: integer;  
    r,s,t,j,k : byte;  
    ff,gg,desen: Matriz;  
    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*x*x+z*z*h*h-2*z*v*h+v*v+2*z*h-2*v+1);  
        2 : x:=z*hx/(z*z*hx*hx+v*v-2*v+1);  
        3 : x:=z*x/(z*z*x*x+z*z*h*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]:=0.467913935;  
    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;
  prochu(x);
  y:=x;
  x:=-ab*xx[i]+ba;
  prochu(x);
  x:=x+y;
  f:=x*aa[i]+f;
end; {for}
f:=f*ab;
end; {proceig}

```

```

procedure DiskInterface(var Numero:integer; var A,B:matriz; EscreveLe: boolean);
{EscreveLe: TRUE => escreve no disco, FALSE => le disco}
var NomeArquivo:string[15];
    Arquivo:text;
    K : real; {variavel Numero transformada em real}
    ErrorCode,Count : byte;
    ErrorFlag: boolean;
begin
  ClrScr;
  GoToXY(5,5);
  if EscreveLe=TRUE then writeln('SAIDA DE DADOS - DISCO') else writeln('ENTRADA DE
DADOS - DISCO');
  writeln;
  TextColor(14);
  write(' Qual o nome do arquivo ? (ex.: D:\ABCDEFGH.ABC) ');
  TextColor(11);
  readln(NomeArquivo);
  TextColor(7);
  ErrorFlag:=TRUE;
  {$I-}
  assign(Arquivo,NomeArquivo);
  if EscreveLe=TRUE then begin
    rewrite(arquivo);
    ErrorCode:=IOResult;
    VerifyError(ErrorCode,ErrorFlag,NomeArquivo);
    if ErrorCode=0 then begin
      K:=Numero/1.0;
      writeln(arquivo,' Coeficiente de pressao a montante: ',v:6:4);
      writeln(arquivo,' Coeficiente de pressao a jusante: ',w:6:4);
      writeln(arquivo,' Dimensoes a montante: ',cc[1]:5:2,' m x ',cc[2]:5:2,' m');
      writeln(arquivo,' Dimensoes a jusante : ',cc[3]:5:2,' m x ',cc[4]:5:2,' m');
      writeln(arquivo,' Razao de contracao : ',u:5:2);
      writeln(arquivo);
      writeln(arquivo,' X Yw Yv desenv. ');
      writeln(arquivo,'-----');
      for count:=0 to Numero do writeln(arquivo,count:3,' ',
GG[count]:2:5,' ',
FF[count]:2:5,' ',
FF[count]:2:5,' ',
desen[count]:2:5);
    end;
  close(arquivo);
  ErrorCode:=IOResult;

```

```

VerifyError(ErrorCode,ErrorFlag,NomeArquivo);
end
else begin
reset(arquivo);
ErrorCode:=IOResult;
VerifyError(ErrorCode,ErrorFlag,NomeArquivo);
if ErrorCode=0 then begin
read(arquivo,K);
Numero:=trunc(K);
for count:=0 to Numero do read(arquivo,A[count],B[count]);
end;
close(arquivo);
ErrorCode:=IOResult;
VerifyError(ErrorCode,ErrorFlag,NomeArquivo);
end;
{$I+}
end;
{-----}
begin {programa principal}

ClrScr;
{ write(lst,chr(15)); }

writeln(' PROGRAMA PARA CALCULO DE CONTRACAO');
writeln(' Whitehead, Wu & Waters, 1951');
writeln;
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(lst, ' PROGRAMA DE CALCULO DE CONTRACAO');
writeln(lst, ' Whitehead, Wu & Waters, 1951');
writeln(lst);
writeln(lst, ' Coeficiente de pressao a montante: ',v:6:4);
writeln(lst, ' Coeficiente de pressao a jusante: ',w:6:4);
writeln(lst, ' Dimensoes a montante: ',cc[1]:5:2, ' m x ',cc[2]:5:2, ' m');
writeln(lst, ' Dimensoes a jusante : ',cc[3]:5:2, ' m x ',cc[4]:5:2, ' m');
writeln(lst, ' Razao de contracao : ',u:5:2);
writeln(lst);
writeln(lst, ' X Yw Yv desenv. ');
writeln(lst, '-----');
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-z-v*v*y*y+z*z*y*y)/(z*z*z+z+v*v*z-z-v*v*y*y-z*z*y*y));
e:=(y*y*y*y+z*z*z*z)/(y*y*z*z);
g:=(z*z*z*z+v*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:=t+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]*(0.5/u);
    write(lst,t:3,' ',gg[t]:7:5,' ');
    gf:=ff[t];
    ff[t]:=0.5*(cc[1]-ff[t]*(cc[1]-cc[3])/(u-1));
    write(lst,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));
    desen[t]:=sum;
    writeln(lst,ff[t]:7:5,sum:10:5);
  end; {else}
end; {for}
r:=r+1;
until r <> 2;
item:=40;
write(lst,chr(27),chr(64));
DiskInterface(item,gg,ff,true); { salva resultados}
end.

```

Os resultados apresentados pelo programa são apresentados conforme a Figura A.5, mostrada a seguir:

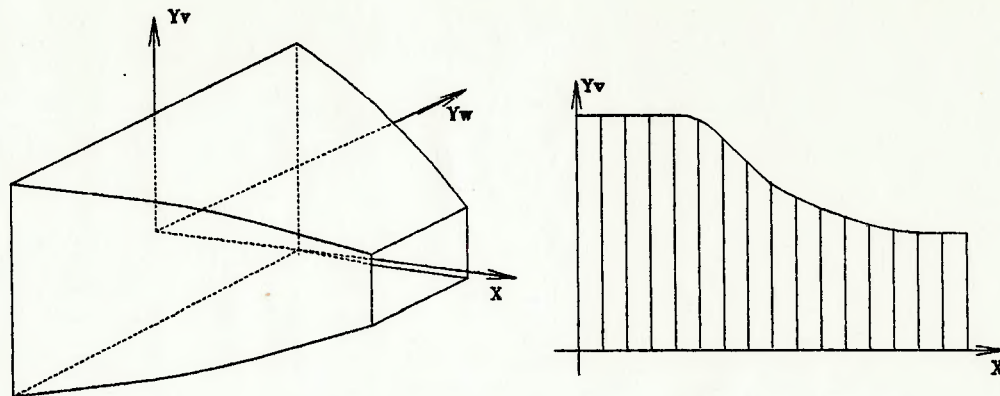


Figura A.5 Esquema da contração

sendo:

X - cota do eixo de simetria da contração

Y_w - cota da superfície da contração na direção w

Y_v - cota da superfície da contração na direção v

desenv. - desenvolvimento da superfície

A seguir é apresentado um exemplo de geometria de contração, que foi baseada na característica dimensional do túnel de vento do Laboratório de Vazão do IPT, com seção de teste quadrada de dimensões de 0,5 x 0,5 m e uma razão de contração 9.

A.2.1. Exemplo

Coefficiente de pressão a montante: 0,1

Dimensões a montante: 1,5 m x 1,5 m

Razão de contração : 9

Coefficiente de pressão a jusante: 0,1

Dimensões a jusante : 0,5 m x 0,5 m

Tabela A.1 Exemplo de resultado produzido pelo programa CONTRAC

ponto	X(m)	Y _w (m)	Y _v (m)	desenv.(m)
0	0,0000	0,7500	0,7500	0,0000
1	0,0635	0,7476	0,7476	0,0636
2	0,1268	0,7430	0,7430	0,1270
3	0,1898	0,7366	0,7366	0,1903
4	0,2524	0,7286	0,7286	0,2535
5	0,3145	0,7189	0,7189	0,3163
6	0,3760	0,7075	0,7075	0,3789
7	0,4368	0,6943	0,6943	0,4411
8	0,4966	0,6792	0,6792	0,5027
9	0,5552	0,6620	0,6620	0,5638
10	0,6124	0,6428	0,6428	0,6241
11	0,6678	0,6215	0,6215	0,6835
12	0,7210	0,5979	0,5979	0,7417
13	0,7716	0,5723	0,5723	0,7984
14	0,8191	0,5446	0,5446	0,8533
15	0,8629	0,5152	0,5152	0,9062
16	0,9025	0,4844	0,4844	0,9564
17	0,9374	0,4527	0,4527	1,0034
18	0,9668	0,4210	0,4210	1,0466
19	0,9901	0,3904	0,3904	1,0851
20	1,0059	0,3631	0,3631	1,1167
21	1,0232	0,3418	0,3418	1,1441
22	1,0435	0,3259	0,3259	1,1699
23	1,0650	0,3131	0,3131	1,1949
24	1,0871	0,3025	0,3025	1,2195
25	1,1098	0,2937	0,2937	1,2437
26	1,1326	0,2862	0,2862	1,2678
27	1,1557	0,2799	0,2799	1,2918
28	1,1790	0,2746	0,2746	1,3156
29	1,2023	0,2700	0,2700	1,3394
30	1,2257	0,2662	0,2662	1,3631
31	1,2492	0,2629	0,2629	1,3868
32	1,2727	0,2601	0,2601	1,4105
33	1,2962	0,2578	0,2578	1,4341
34	1,3198	0,2558	0,2558	1,4577
35	1,3433	0,2542	0,2542	1,4814
36	1,3669	0,2528	0,2528	1,5050
37	1,3905	0,2517	0,2517	1,5286
38	1,4141	0,2509	0,2509	1,5522
39	1,4377	0,2503	0,2503	1,5758
40	1,4613	0,2500	0,2500	1,5994