

CARLOS FERNANDO BLEY CARNEIRO



**CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO DE AR EM AERADORES  
DE FLUXOS DE ALTA VELOCIDADE**

Dissertação apresentada no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, promovido pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza - CEHPAR, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

CURITIBA

1996

CARLOS FERNANDO BLEY CARNEIRO

## **CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO DE AR EM AERADORES DE FLUXOS DE ALTA VELOCIDADE**

Dissertação apresentada no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, promovido pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza - CEHPAR, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

CURITIBA

1996

BC / MUFPR  
DOAÇÃO: autor  
R\$ 15.00  
20/02/2003  
000000/000000/00000000

BC/MUFPR - MEMORIA DA UNIVERSIDADE F. DO PARANA  
AUTOR  
R\$ 15.00 - Doacao  
Termo No. 30/03 Registro:337,271  
24/02/2003

UFPR - Sistema de Bibliotecas

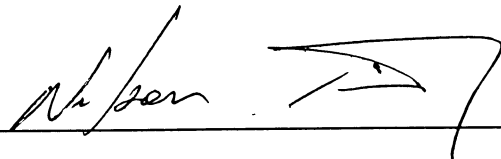
PR000355281

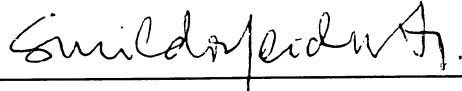
**CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO DE AR EM AERADORES  
DE FLUXO DE ALTA VELOCIDADE**

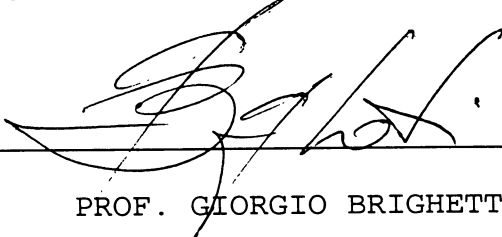
por

CARLOS FERNANDO BLEY CARNEIRO

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná pela Comissão formada pelos professores:

ORIENTADOR:   
\_\_\_\_\_  
PROF. NELSON LUIZ DE SOUSA PINTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MEMBROS:   
\_\_\_\_\_  
PROF. SINILDO HERMES NEIDERT  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

  
\_\_\_\_\_  
PROF. GIORGIO BRIGHETTI  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Curitiba, 22 de novembro de 1996

Aos meus pais

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Nelson L. de S. Pinto, pelo incentivo e apoio como orientador.

Aos colegas do Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza - CEHPAR que contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

	<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	vii
	<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
	<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiv
	<b>RESUMO</b> .....	xvi
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1	AERADORES.....	1
1.2	DESEMPENHO DE AERADORES.....	5
1.3	ESCOAMENTO DO AR EM AERADORES.....	8
1.4	TRATAMENTO ANALÍTICO DO ESCOAMENTO DE AR.....	13
1.5	OBJETIVO DO TRABALHO.....	21
<b>2</b>	<b>VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL</b> .....	24
2.1	DESCRIÇÃO DO MODELO.....	24
2.2	MEDIÇÕES EFETUADAS.....	35
2.2.1	Alturas Piezométricas.....	35
2.2.2	Velocidades.....	36
2.3	RESULTADOS OBTIDOS.....	40
2.3.1	Vazões de Ar.....	40
2.3.1.1	Vazão de Ar Total.....	40
2.3.1.2	Vazões de Ar no Duto de Aeração.....	43
2.3.2	Coeficiente de Coriolis.....	46
2.3.3	Perdas de Carga na Torre de Admissão.....	48
2.3.4	Perda de Carga Contínua no Duto de Aeração.....	55

2.3.5	Perda de Carga Localizada no Início do Duto de Aeração.....	60
<b>3</b>	<b>VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....</b>	<b>64</b>
3.1	PARÂMETROS.....	64
3.1.1	Seção Transversal do Duto de Aeração.....	64
3.1.2	Distribuição de Vazões ao Longo do Duto de Aeração... ..	64
3.1.3	Coeficiente de Coriolis.....	65
3.1.4	Perdas de Carga na Torre de Admissão.....	66
3.1.5	Perda de Carga Local na Entrada do Duto de Aeração....	67
3.1.6	Perda de Carga Contínua no Duto de Aeração.....	71
3.2	COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE MODELO E DE PROTÓTIPO.....	78
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>92</b>
	<b>ANEXO 1.....</b>	<b>95</b>
	<b>ANEXO 2.....</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXO 3.....</b>	<b>106</b>
	<b>ANEXO 4.....</b>	<b>118</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>121</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A = ÁREA DA SEÇÃO DE CONTROLE DO DUTO DE AERAÇÃO
- $A_D$  = ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO DUTO DE AERAÇÃO
- $A_s$  = ÁREA DA SEÇÃO DE ESCOAMENTO
- $\Delta A_{si}$  = ÁREA ENTRE DUAS ISÓTACAS
- B = COMPRIMENTO DO DUTO DE AERAÇÃO
- C = COEFICIENTE DE DESCARGA
- D = ÁREA EFETIVA DO DUTO DE AERAÇÃO POR UNIDADE DE COMPRIMENTO
- F = NÚMERO DE FROUDE
- f = FATOR DE RESISTÊNCIA
- $f_D$  = FATOR DE RESISTÊNCIA NO DUTO DE AERAÇÃO
- $f_T$  = FATOR DE RESISTÊNCIA NO DUTO DE ADMISSÃO
- g = ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE
- h = PROFUNDIDADE DA ÁGUA, MEDIDA NA NORMAL AO FUNDO
- $h_{p1}$  = PERDA DE CARGA LOCAL NA ENTRADA DO DUTO DE ADMISSÃO
- $h_{p2}$  = PERDA DE CARGA CONTÍNUA AO LONGO DO DUTO DE ADMISSÃO
- $h_{p3}$  = PERDA DE CARGA LOCAL NA ENTRADA DO DUTO DE AERAÇÃO
- $h_{p4}$  = PERDA DE CARGA CONTÍNUA AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO
- $\Delta H$  = DIFERENÇA ENTRE PRESSÃO ATMOSFÉRICA E PRESSÃO EM DETERMINADO PONTO, EXPRESSA EM ALTURA MANOMÉTRICA
- $\Delta h_{13}$  = DIFERENÇA DE PRESSÃO ENTRE AS POSIÇÕES 1 E 3
- K = COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA

$K_1$  = CONSTANTE DE AERADOR  
 $K_2$  = CONSTANTE DE AERADOR  
 $K_3$  = CONSTANTE DE AERADOR  
 $K_{L1}$  = COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA LOCAL NA ENTRADA DO DUTO DE ADMISSÃO  
 $K_{L3}$  = COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA LOCAL NA ENTRADA DO DUTO DE AERAÇÃO  
 $K_S$  = COEFICIENTE DE STRICKLER  
 $K_{SR}$  = COEFICIENTE DE STRICKLER REFERENTE AO TRECHO MAIS RUGOSO DO PERÍMETRO  
 $K_{SS}$  = COEFICIENTE DE STRICKLER REFERENTE AO TRECHO MENOS RUGOSO DO PERÍMETRO  
 $K_{ST}$  = COEFICIENTE DE STRICKLER REFERENTE AO PERÍMETRO TOTAL DA SEÇÃO DE ESCOAMENTO  
 $P$  = PERÍMETRO  
 $P_R$  = PERÍMETRO MAIS RUGOSO  
 $P_S$  = PERÍMETRO MENOS RUGOSO  
 $P_T$  = PERÍMETRO TOTAL  
 $\Delta p$  = DIFERENÇA ENTRE PRESSÃO ATMOSFÉRICA E PRESSÃO EM DETERMINADO PONTO  
 $\overline{\Delta p}$  = DIFERENÇA ENTRE PRESSÃO ATMOSFÉRICA E PRESSÃO MÉDIA SOB O JATO  
 $\Delta p_s$  = PERDA DE CARGA  
 $Q$  = VAZÃO DE ÁGUA  
 $q$  = VAZÃO DE ÁGUA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO  
 $Q_{AR}$  = VAZÃO DE AR  
 $q_{AR}$  = VAZÃO DE AR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO  
 $Q_x$  = VAZÃO DE AR NA SEÇÃO DO DUTO DE AERAÇÃO A UMA DISTÂNCIA  $x$

$Q_2$  = VAZÃO DERIVADA  
 $Q_1$  = VAZÃO TOTAL  
 $R_D$  = NÚMERO DE REYNOLDS NO DUTO DE AERAÇÃO  
 $R_{hd}$  = RAIOS HIDRÁULICO DO DUTO DE AERAÇÃO  
 $R_{ht}$  = RAIOS HIDRÁULICO DO DUTO DE ADMISSÃO  
 $R_T$  = NÚMERO DE REYNOLDS NO DUTO DE ADMISSÃO  
 $T$  = COMPRIMENTO DO DUTO DE ADMISSÃO  
 $t$  = ALTURA DE RAMPA E/OU DEGRAU  
 $U$  = VELOCIDADE MÉDIA EXTERNA À CAMADA LIMITE  
 $\bar{u}$  = VELOCIDADE MÉDIA A UMA DISTÂNCIA  $w$   
 $u_*$  = VELOCIDADE DE CORTE  
 $V$  = VELOCIDADE MÉDIA  
 $v$  = VELOCIDADE EM DETERMINADO PONTO  
 $V_D$  = VELOCIDADE MÉDIA DO AR NO DUTO DE AERAÇÃO  
 $V_E$  = VELOCIDADE MÉDIA DO AR NA ENTRADA DO DUTO DE AERAÇÃO  
 $V_i$  = VELOCIDADE MÉDIA DO AR ENTRE DUAS ISÓTACAS  
 $V_1$  = VELOCIDADE MÉDIA NA SEÇÃO 1  
 $V_{MAX}$  = VELOCIDADE DO AR NA SEÇÃO CONTRAÍDA  
 $V_T$  = VELOCIDADE MÉDIA DO AR NO DUTO DE ADMISSÃO  
 $V_x$  = VELOCIDADE MÉDIA DO AR NA SEÇÃO DO DUTO DE AERAÇÃO A UMA DISTÂNCIA  $x$   
 $w$  = DISTÂNCIA AO CONTORNO SÓLIDO  
 $x$  = DISTÂNCIA MEDIDA A PARTIR DO INÍCIO DO DUTO DE AERAÇÃO  
 $y$  = ABCISSA DO PERFIL SUPERIOR DO DUTO DE AERAÇÃO  
 $z$  = ORDENADA DO PERFIL SUPERIOR DO DUTO DE AERAÇÃO  
 $\alpha$  = COEFICIENTE DE CORIOLIS

- $\beta$  = RELAÇÃO ENTRE  $Q_{AR}$  E  $Q$
- $\delta$  = ESPESSURA DA CAMADA LIMITE
- $\gamma$  = PESO ESPECÍFICO DA ÁGUA
- $\gamma_{AR}$  = PESO ESPECÍFICO DO AR
- $\gamma_3$  = CONSTANTE DE AERADOR
- $\nu$  = VISCOSIDADE CINEMÁTICA DO AR
- $\rho_{AR}$  = MASSA ESPECÍFICA DO AR
- $\zeta_d$  = COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA

## LISTA DE FIGURAS

1	PRINCIPAIS TIPOS DE AERADOR.....	2
2	DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES NO ESCOAMENTO DE ÁGUA PRÓXIMO A UM AERADOR.....	4
3	SISTEMAS DE ADMISSÃO DE AR EM AERADORES.....	6
4	DEFINIÇÃO BÁSICA DE UM AERADOR.....	9
5	SEÇÃO TRANSVERSAL E DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES DE UM AERADOR TÍPICO.....	11
6	TESTE EM MODELO SECCIONAL DO VERTEDOURO DE FOZ DO AREIA.....	12
7	SEÇÃO TRANSVERSAL DO DUTO DE AERAÇÃO.....	12
8	DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - FORMULAÇÃO DE WOOD.....	15
9	AERADORES DE FOZ DO AREIA.....	18
10	SEÇÃO TRANSVERSAL DO DUTO DE AERAÇÃO.....	22
11	MODELO PREPARADO PARA TESTES DA SÉRIE 1.....	27
12	MODELO REDUZIDO UTILIZADO NOS TESTES DAS SÉRIES 1 E 2...	28
13	MODELO PREPARADO PARA TESTES DA SÉRIE 2.....	29
14	POSIÇÕES DAS TOMADAS DE PRESSÃO.....	31
15	MODELO PREPARADO PARA TESTES DA SÉRIE 3.....	32
16	MODELO REDUZIDO UTILIZADO NOS TESTES DA SÉRIE 3.....	33
17	MANÔMETRO TIPO WAHLEN UTILIZADO NOS TESTES.....	34
18	PONTOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE NA TORRE.....	37
19	PONTOS DE LEITURA COM TUBO DE ESTAGNAÇÃO NO DUTO DE AERAÇÃO.....	39

20	$Q_x/Q_{AR}$ AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO.....	47
21	$\alpha$ AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO.....	50
22	COEFICIENTE $K_{L1}$ EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS NA TORRE.....	54
23	FATOR DE RESISTÊNCIA NO DUTO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS NO DUTO.....	58
24	GRÁFICO APRESENTADO POR H. ITO E K. IMAI (1973).....	70
25	COMPOSIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES NO MODELO PROPOSTO.....	79
26	PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO E APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO - TESTES 5, 4 E 3.....	85
27	PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO E APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO - TESTES 2 E 1.....	86
28	PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO E APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO - TESTES 6 E 7.....	87
29	PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO E APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO - TESTES 8 E 9.....	88
30	PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO E APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO - TESTES 12 E 10.....	89
31	PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO E APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO - TESTE 11.....	90
32	PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO E APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO - TESTE 13.....	91

33	LINHA PIEZOMÉTRICA NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTES 1, 2 E 3.....	96
34	LINHA PIEZOMÉTRICA NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTES 4, 5 E 6.....	97
35	LINHA PIEZOMÉTRICA NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTES 7 E 8.....	98
36	LINHA PIEZOMÉTRICA NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTES 9 E 10.....	99
37	LINHA PIEZOMÉTRICA NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 11.....	100
38	ISÓTACAS NA SEÇÃO DA TOMADA 49 - TESTES 1, 2 E 3.....	102
39	ISÓTACAS NA SEÇÃO DA TOMADA 49 - TESTES 4, 5 E 6.....	103
40	ISÓTACAS NA SEÇÃO DA TOMADA 49 - TESTES 7, 8 E 9.....	104
41	ISÓTACAS NA SEÇÃO DA TOMADA 49 - TESTES 10 E 11.....	105
42	ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 01.....	107
43	ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 02.....	108
44	ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 03.....	109
45	ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 04.....	110
46	ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 05.....	111
47	ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 06.....	112
48	ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 07.....	113
49	ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 08.....	114
50	ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 09.....	115
51	ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 10.....	116
52	ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTE 11.....	117

## LISTA DE TABELAS

1	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO DUTO DE AERAÇÃO NO MODELO EM ESCALA 1:8.....	25
2	VAZÕES DE AR ATRAVÉS DO DUTO DE ADMISSÃO x PRESSÕES NA TOMADA 26.....	42
3	VAZÕES DE AR NO DUTO DE AERAÇÃO EM 1/s - TESTES COM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA.....	44
4	VAZÕES DE AR NO DUTO DE AERAÇÃO DIVIDIDAS PELA VAZÃO DE AR NO DUTO DE ADMISSÃO - TESTES COM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA.....	45
5	COEFICIENTE DE CORIOLIS.....	49
6	PERDAS DE CARGA NA TORRE.....	53
7	FATOR DE RESISTÊNCIA NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTES SEM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA.....	57
8	PERDA DE CARGA NO DUTO DE AERAÇÃO - TESTES DA SÉRIE 3 ....	59
9	COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA LOCALIZADA NA ENTRADA DO DUTO DE AERAÇÃO - TESTES SEM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA.....	61
10	COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA LOCALIZADA NA ENTRADA DO DUTO DE AERAÇÃO - TESTES COM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA.....	63
11	COMPARATIVO ENTRE VALORES DE $K_{L3}$ .....	68
12	FATOR DE RESISTÊNCIA $f_D$ NO DUTO DE AERAÇÃO DO AERADOR 1 DE FOZ DO AREIA - TESTES 5, 4, 3 E 2 - OPERAÇÃO SIMÉTRICA.....	73

13	FATOR DE RESISTÊNCIA $f_D$ NO DUTO DE AERAÇÃO DO AERADOR 1 DE FOZ DO AREIA - TESTES 1, 6 E 7 - OPERAÇÃO SIMÉTRICA.....	74
14	FATOR DE RESISTÊNCIA $f_D$ NO DUTO DE AERAÇÃO DO AERADOR 1 DE FOZ DO AREIA - TESTES 8, 9 E 12 - OPERAÇÃO ASSIMÉTRICA.....	75
15	FATOR DE RESISTÊNCIA $f_D$ NO DUTO DE AERAÇÃO DO AERADOR 1 DE FOZ DO AREIA - TESTES 10, 11 E 13 - OPERAÇÃO ASSIMÉTRICA.....	76
16	PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO E VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO - TESTES 5, 4, 3 E 2.....	80
17	PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO E VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO - TESTES 1, 6 E 7.....	81
18	PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO E VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO - TESTES 8, 9 E 12.....	82
19	PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO E VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO - TESTES 10, 11 E 13.....	83

## RESUMO

A avaliação de vazões de ar em aeradores pode ser feita com auxílio de equações ajustadas a dados de protótipo. Porém, seu uso requer o conhecimento das pressões sob o jato e portanto uma estimativa das condições do fluxo de ar (pressão - velocidade). Buscando esclarecer alguns aspectos da modelagem matemática do escoamento de ar nos aeradores, foi estudada em detalhe a perda de carga nos dutos de admissão e aeração em aerador do tipo utilizado no vertedouro de Foz do Areia. Os testes em modelo reduzido mostraram que a perda de carga é sensível à geometria e ao grau de expansão do fluxo na transição entre os dutos e à ocorrência de distribuição em marcha no duto de aeração. O escoamento de ar ao longo do duto de aeração foi analisado, abrangendo as questões da rugosidade da interface ar-água e da distribuição de vazões de ar. A partir dos resultados obtidos e do modelo proposto por Clóvis Ávila (1991) modelou-se numericamente o escoamento de ar no aerador nº 1 do vertedouro de Foz do Areia e fez-se confronto com valores medidos em protótipo.

## **ABSTRACT**

The evaluation of entrained air flow at aerators can be done with equations adjusted to prototype data. The use of these equations requires the knowledge of pressures below the water jet and consequently the evaluation of flow conditions (pressure - velocity). A study of head losses at the intake and in the aeration ducts of an aerator similar to the Foz do Areia aerator was carried out in order to investigate some aspects of mathematical modeling of air flow. Model tests have shown that the head loss is affected by geometry and expansion of flow at the entrance of the aerator duct and by flow distribution along the duct. The air flow along the aeration duct was studied, including the air-water interface roughness and the air distribution along the duct. The information from this study and the model proposed by Clóvis Ávila (1991) were used to mathematically model air flow at Foz do Areia spillway aerator #1. The results were compared to prototype data.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 AERADORES

A aeração dos fluxos de alta velocidade tem sido utilizada para prevenir danos decorrentes de cavitação em estruturas hidráulicas.

Em vertedouros de superfície livre a aeração natural do escoamento principia no ponto onde a camada limite atinge a superfície livre. A partir daí o ar é capturado pelas perturbações superficiais e se mistura ao escoamento por efeito da turbulência, até chegar ao contorno sólido. Esse tipo de aeração evita efeitos da cavitação em calhas de vertedouros com vazões específicas inferiores a  $10 \text{ m}^3/\text{s.m}$  (SEMENKOV e LENTJAEV, 1973).

À medida que as vazões unitárias crescem, torna-se maior a distância para que o ar comece a ser arrastado e eventualmente atinja as proximidades do fundo da calha. O escoamento pode, então, atingir velocidades elevadas sem presença do ar junto ao contorno sólido, tornando mais provável a cavitação. Para evitá-la recorre-se cada vez mais à aeração do fluxo por meio de aeradores.

Degraus ou rampas transversais ao fluxo de água são os tipos básicos de aerador, apresentados nas figuras 1a e 1b

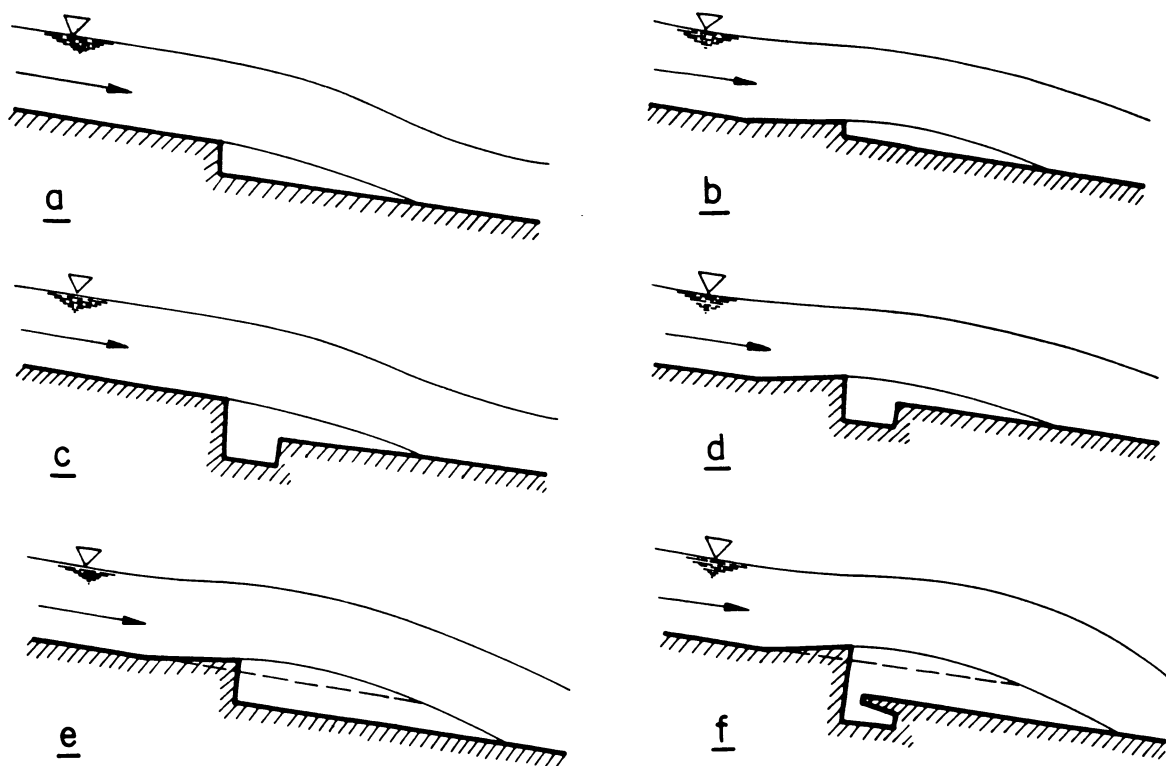


Figura 1 — Principais tipos de aerador

(PINTO, 1982). Esses dispositivos produzem uma interface ar-água sob o escoamento, ao longo da qual o ar é arrastado. A adição de um recesso ou uma galeria, conforme ilustrado nas figuras 1c e 1d, pode ser necessária para facilitar o fluxo transversal do ar sob o jato. As figuras 1e e 1f ilustram combinações possíveis de rampas, degraus e galerias.

No aerador ocorre uma brusca alteração na distribuição de pressões do escoamento, conforme ilustrado na figura 2 (PINTO e NEIDERT, 1983). ' No trecho anterior ao salto a distribuição de pressões é hidrostática. Se existir rampa, ocorrerá um acréscimo de pressões em torno do ponto de alteração de declividade. Após o salto, com o jato praticamente em queda livre, a distribuição passa a ser quase uniforme. Esta súbita mudança na configuração das pressões provoca uma intensificação da turbulência. A incipiência da aeração, que depende da superação dos efeitos de tensão superficial pela turbulência, fica facilitada. O emulsionamento se processa tanto na superfície superior como inferior do jato. Há uma intensa formação de borrifos, produzindo-se um mecanismo eficiente de arraste de ar. As bolhas de ar misturam-se à água por ação da turbulência.

Quando o jato de água atinge o contorno sólido, forma-se uma zona de pressões mais elevadas na região do impacto. Gradualmente a condição hidrostática é restabelecida a jusante. A distribuição de pressões favorece a ascensão do ar na água.

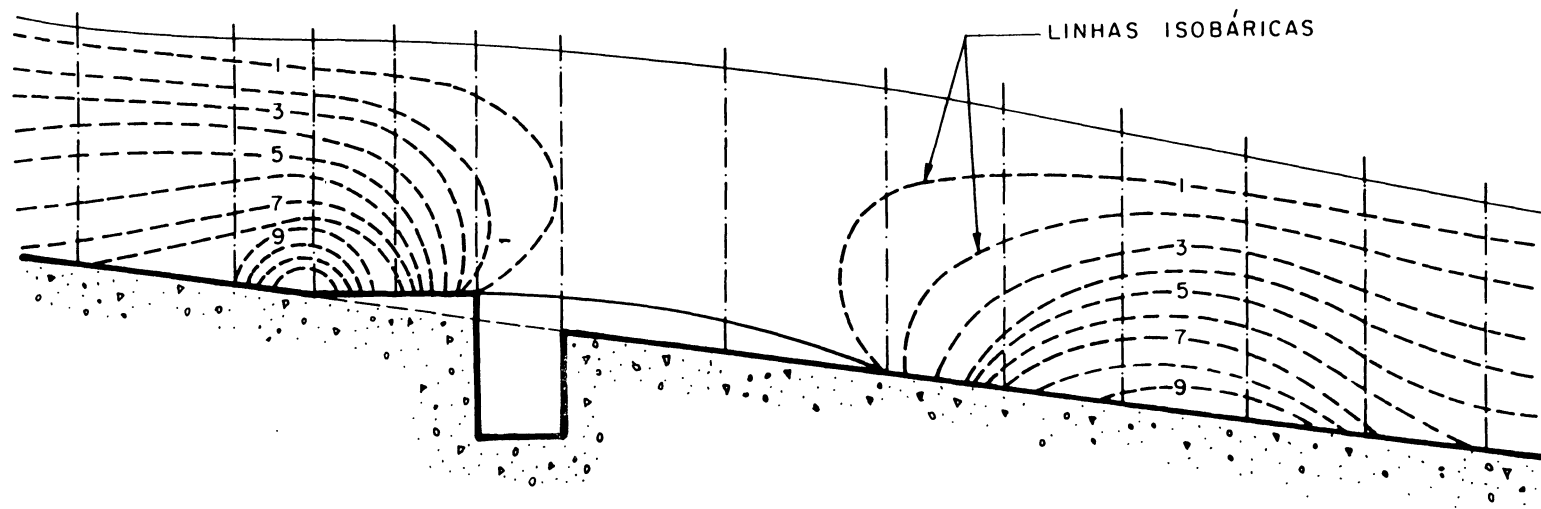


Figura 2 — Distribuição de pressões no escoamento de água próximo a um aerador.

Por outro lado, a turbulência tende a manter a mistura ar-água. Após certo trecho é atingido um estado de equilíbrio da distribuição da concentração de ar no escoamento, função dos efeitos de turbulência e gravidade.

A admissão do ar sob o jato de água é efetuada lateralmente através de torres de aeração ou dispositivos localizados na parede lateral, conforme ilustra a figura 3 (PINTO, 1988).

A definição dos tipos de aerador e de sistema de alimentação é feita em função das características geométricas e de operação do vertedouro. Depende ainda do fato da obra estar concluída ou em projeto, ou seja, tratar-se da adição de um dispositivo de aeração a uma obra existente ou de um projeto novo em que o grau de liberdade é maior.

## 1.2 DESEMPENHO DE AERADORES

Designando-se por  $Q_{AR}$  a vazão de ar e  $Q$  a vazão de água, costuma-se caracterizar o desempenho de um aerador pela relação  $\beta = Q_{AR}/Q$  ou  $\beta = q_{AR}/q$  exprimindo-se por unidade de largura.

$$\text{Pode-se demonstrar que } \beta = f(F, D/h, t/h) \quad (1)$$

onde:

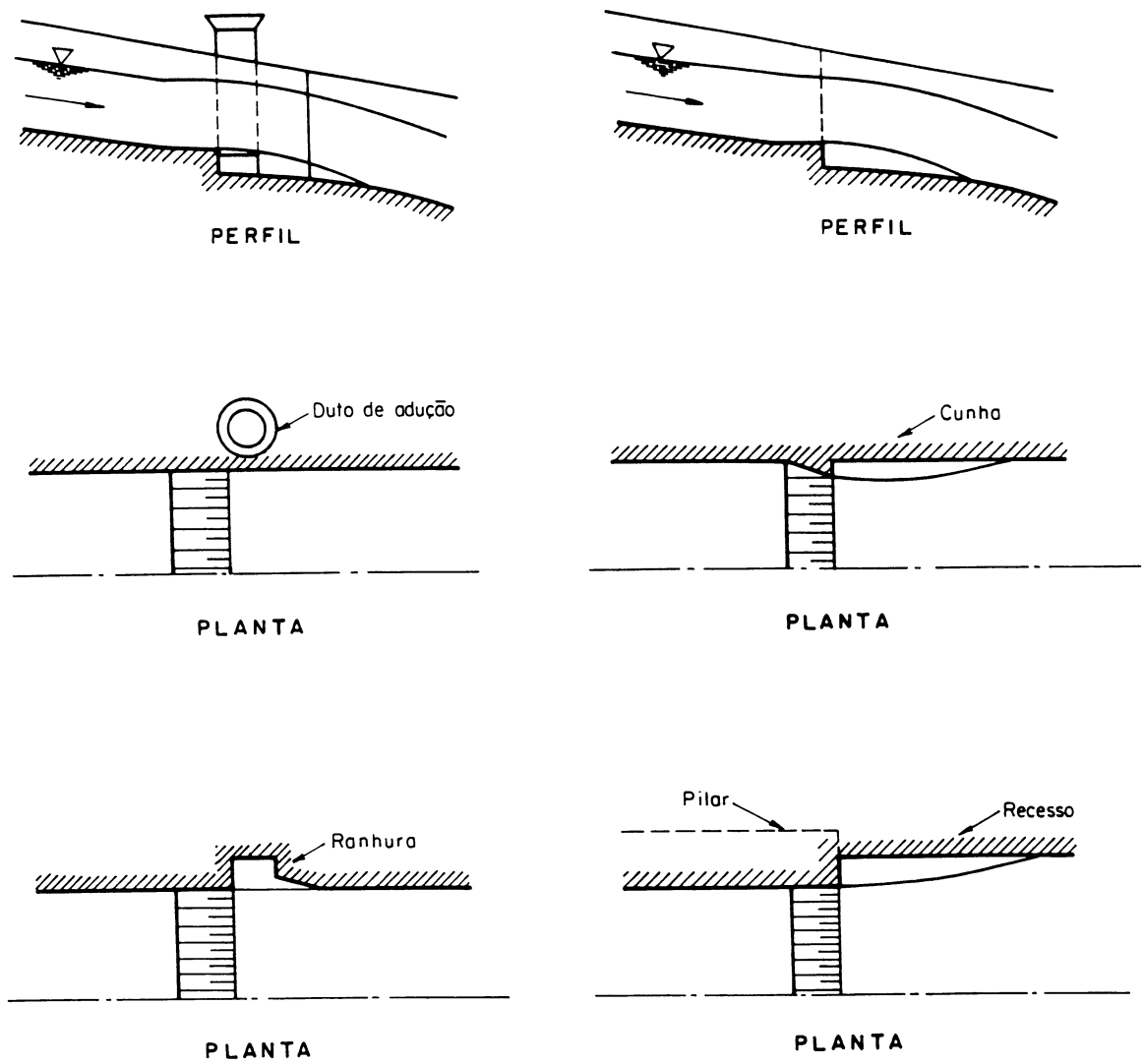


Figura 3 - Sistemas de admissão de ar em aeradores

$F$  = número de Froude no escoamento líquido =  $v/\sqrt{gh}$ ;

$h$  = profundidade do fluxo sem aeração na seção do aerador, considerada na normal ao fundo;

$t$  = altura da rampa e/ou degrau;

$D$  = área efetiva do duto de aeração por unidade de comprimento.

O parâmetro  $D$  pode ser expresso como

$$D = CA/B$$

onde, com referência à figura 4:

$A$  = área da seção de controle do duto de aeração;

$B$  = comprimento do duto de aeração;

$C$  = coeficiente de descarga da equação para cálculo de vazão de ar através dos dutos do aerador:

$$q_{AR}B = CA\sqrt{2\Delta p/\rho_{AR}}$$

onde  $\overline{\Delta p}$  é a diferença entre pressão atmosférica e pressão média sob o jato e  $\rho_{AR}$  é a massa específica do ar.

O estudo de resultados de medidas efetuadas em diversos protótipos permitiu definir equações empíricas, úteis ao predimensionamento de aeradores. A resultados de testes em Foz do Areia foi ajustada a equação (PINTO, 1989):

$$\beta = 0,47 (F - 4,5)^{0,59} (D/h)^{0,60} \quad (2)$$

após ter sido constatado que a influência de  $t/h$  era muito pequena e poderia ser desconsiderada. Da mesma forma, a dados provenientes de 5 obras, inclusive de Foz do Areia, ajustou-se a equação:

$$\beta = 0,29 (F - 1)^{0,62} (D/h)^{0,59} \quad (3)$$

A figura 4 ilustra parâmetros relacionados à geometria de aeradores. Apresenta também um diagrama simplificado de distribuição de pressões sob o jato de água. As perdas de carga crescem no sentido do escoamento do ar, enquanto a velocidade do fluxo de ar decresce em razão do arraste do ar pela água. A soma das perdas de carga e altura de velocidade define a pressão em cada ponto.

Para a aplicação prática das equações (2) ou (3) há necessidade de se calcular analiticamente o coeficiente  $C$ , conhecida a geometria do aerador. Conseqüentemente, o interesse se estende ao estudo do fluxo de ar pelo sistema de aeração e sua relação com a distribuição de pressões sob o jato.

### 1.3 ESCOAMENTO DO AR EM AERADORES

O ar penetra no aerador através dos dutos de admissão do ar e circula transversalmente ao fluxo de água à medida que é arrastado pela corrente.

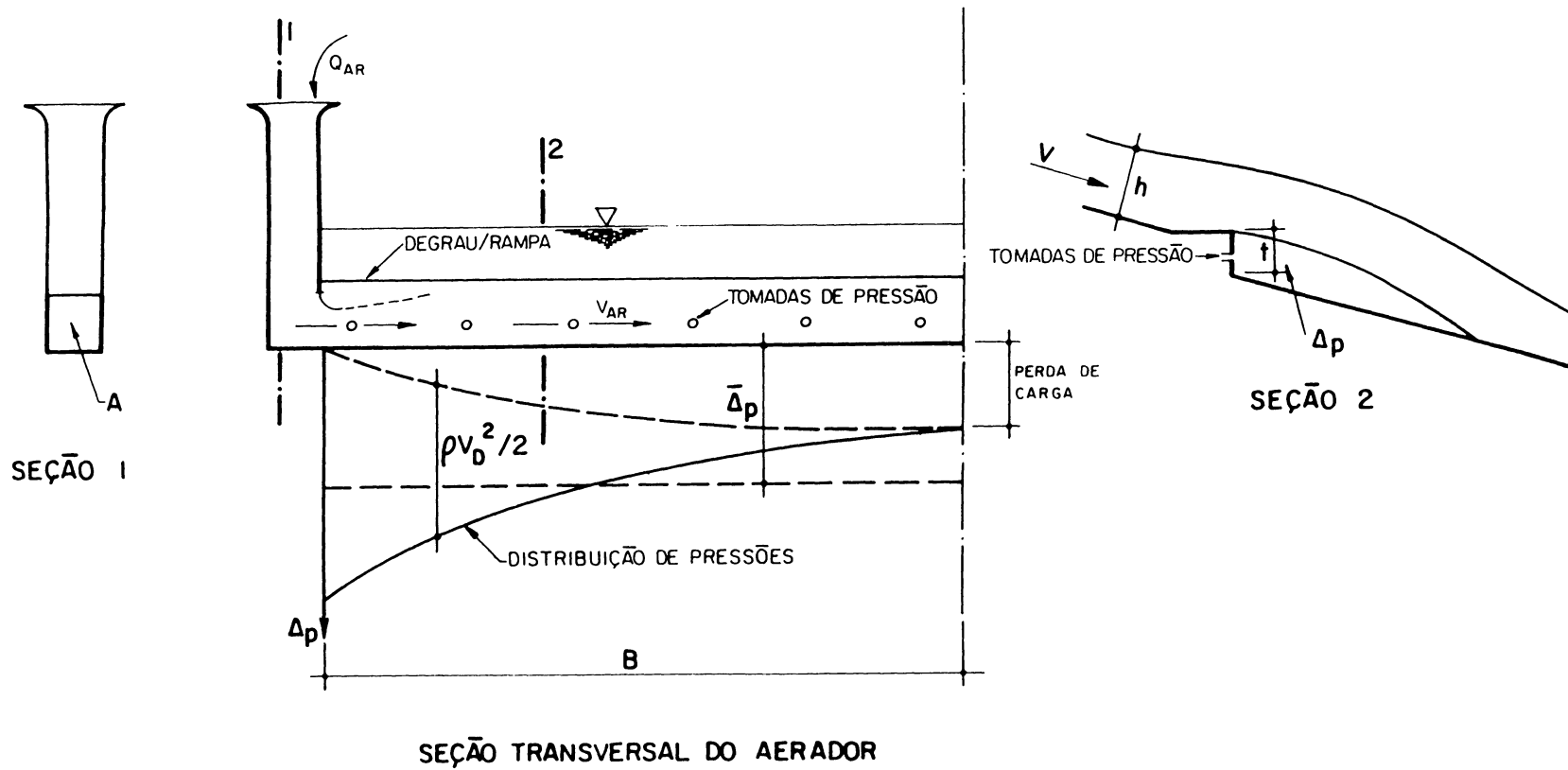


Figura 4 - Definição básica de um aerador

Um aerador típico é ilustrado em seção transversal na figura 5. Neste tipo de aerador o acesso do ar é feito por torres externas aos muros da calha. Ao longo destes dutos de admissão a vazão de ar mantém-se constante. A partir da entrada do duto de aeração passa a ocorrer arraste de ar e a vazão ao longo do duto diminui, anulando-se no eixo de simetria da calha. A lei de variação de vazão de ar influi nas distribuições de velocidade e de perda de carga e, portanto, na distribuição das pressões. Estes elementos são definidos também em função das características geométricas do duto de aeração. No aerador em consideração esse duto é limitado em sua região inferior pelo contorno sólido e na região superior pelo próprio jato de água, conforme ilustram as figuras 6 e 7.

Ao longo do aerador o escoamento sofre perdas de energia que podem ser agrupadas nos seguintes componentes:

- a)  $h_{p1}$  = perda de carga local, na entrada do duto de admissão;
- b)  $h_{p2}$  = perda de carga contínua, ao longo do duto de admissão;
- c)  $h_{p3}$  = perda de carga local, na entrada do duto de aeração;
- d)  $h_{p4}$  = perda de carga contínua, ao longo do duto de aeração.

A pressão numa seção qualquer do aerador sempre é menor que a atmosférica. A leitura piezométrica equivale à perda de

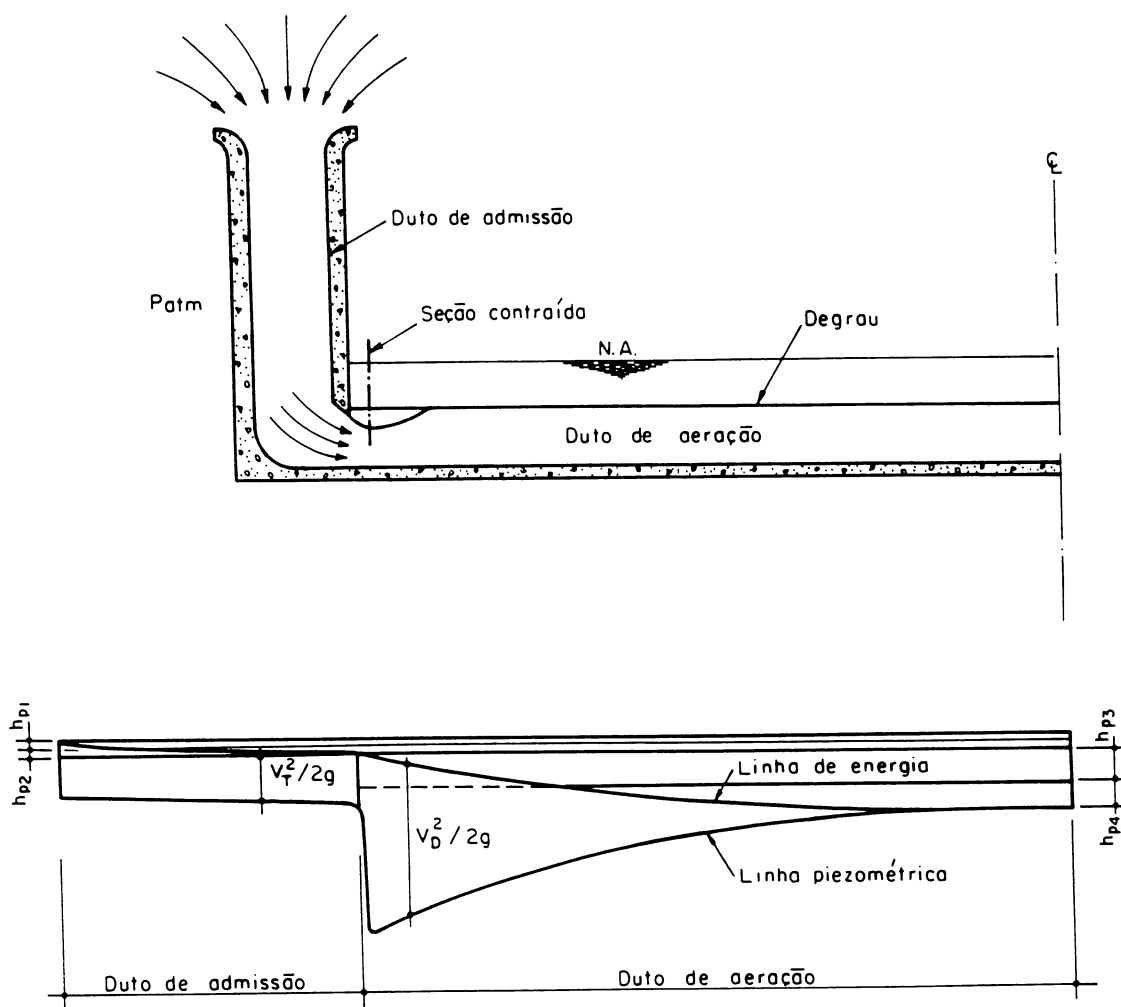


Figura 5 - Seção transversal e distribuição de pressões de um aerador típico

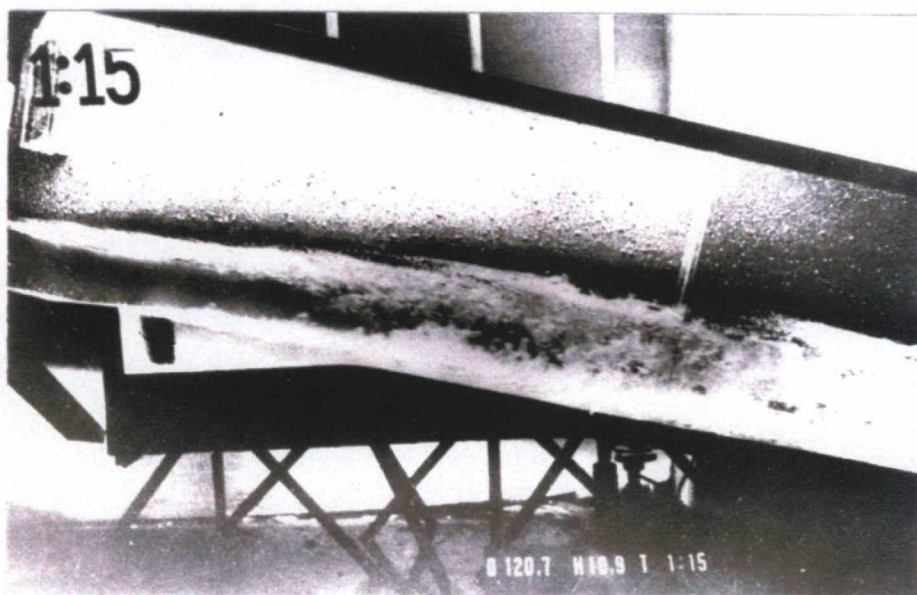


Figura 6 - Teste em modelo seccional do vertedouro de Foz do Areia

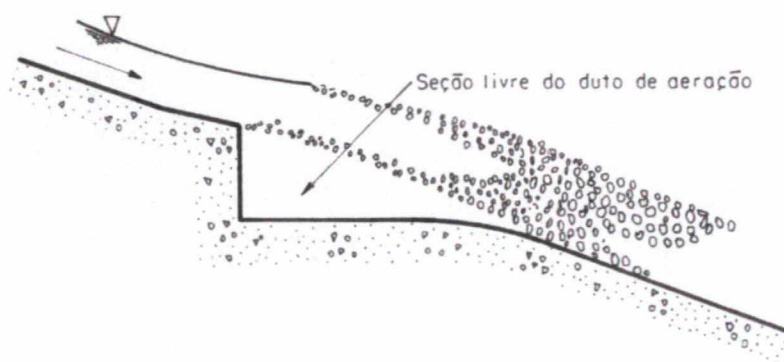


Figura 7 - Seção transversal do duto de aeração

carga no trecho anterior à posição considerada somada à altura de velocidade do fluxo de ar, conforme apresenta a figura 5.

O cálculo analítico da distribuição de pressões em aeradores não é um assunto completamente resolvido. Depende essencialmente do conhecimento das perdas de carga locais e contínuas e da lei de variação da vazão de ar no longo do duto de aeração. A finalidade principal deste estudo é contribuir para o melhor entendimento desta questão.

#### 1.4 TRATAMENTO ANALÍTICO DO ESCOAMENTO DE AR

Estudos anteriores procuraram definir um método para a determinação analítica de grandezas envolvidas no escoamento do ar em aeradores.

Ian R. WOOD (1985) propôs um modelo numérico para a definição da distribuição de pressões sob o jato a partir das seguintes premissas:

- a) escoamento unidimensional do ar ao longo do duto de aeração, isto é, a velocidade não varia com a posição ao longo da seção transversal do duto;
- b) seção transversal do duto de aeração constante e igual à da entrada de ar;
- c) distribuição de vazão de ar ao longo do duto sob o jato baseada na consideração que há uma relação entre a vazão de ar sendo arrastada pela água e o número de

Froude e a pressão sob o jato a cada seção; esta relação é expressa como:

$$q_{AR} = q \left[ K_1 (F - K_2) - K_3 \left( \frac{\Delta p}{\gamma h} \right)^{\gamma_3} \right]$$

onde:

$q$  = vazão de água por unidade de comprimento;

$K_1, K_2, K_3, \gamma_3$  = constantes para cada aerador;

$F$  = número de Froude no escoamento líquido;

$\Delta p$  = diferença entre pressões atmosférica e na posição considerada;

$\gamma$  = peso específico da água;

$h$  = profundidade da água na normal ao fundo;

d) perda de carga contínua ao longo do duto de aeração desconsiderada;

e) perdas de carga na torre de admissão desprezíveis;

f) perda de carga concentrada na entrada do duto de aeração, expressa por:

$$\Delta p_s = K \frac{V_T^2}{2g}$$

onde:

$K$  = coeficiente de perda de carga localizada;

$V_T$  = velocidade do ar na torre.

A figura 8 ilustra a distribuição de pressões em duto de aeração a partir da formulação de Wood.

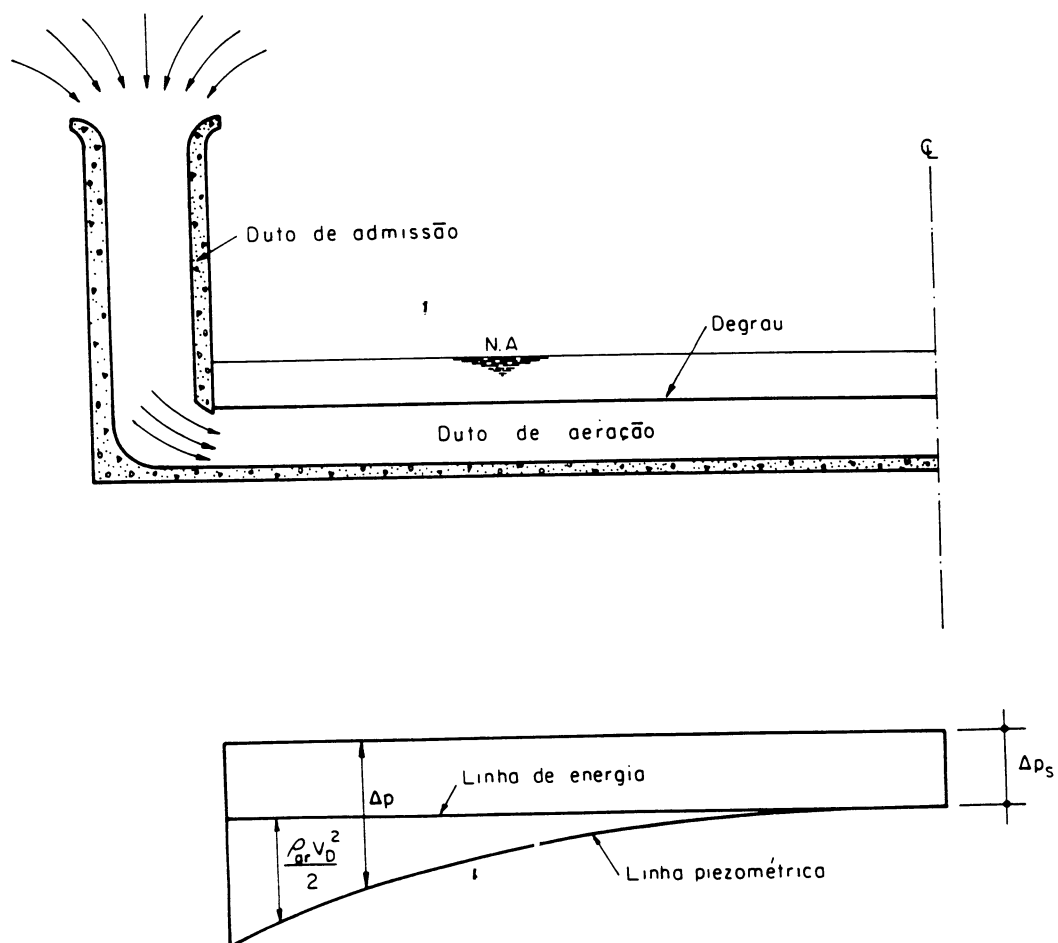


Figura 8 - Distribuição de pressões ao longo do duto de aeração - Formulação de Wood

Conforme verificado por Clóvis M. ÁVILA (1990), o modelo de Wood tem uma conceituação muito simplificada quanto às perdas de carga. Não se justifica considerar a redução de pressão devida à perda de carga local à entrada do duto de aeração concentrada junto à entrada. A perda de carga se dá ao longo do escoamento a jusante da seção de transição por efeito das perdas viscosas. Por outro lado, a perda contínua ao longo do duto nem sempre é desprezível. O efeito dos borrifos sobre a resistência ao fluxo de ar pode ser importante. Também as perdas de carga na própria torre de admissão têm sua importância.

A adoção da equação

$$Q_{AR} = Q \left[ K_1 (F - K_2) - K_3 \left( \frac{\Delta p}{\gamma h} \right)^{y_3} \right]$$

verificada para a vazão total não pode ser comprovada em termos de distribuição ao longo do duto de aeração.

Clóvis M. Ávila propôs um modelo alternativo para o cálculo de pressões. Nesse modelo foram adotadas as seguintes premissas:

- a) fluxo de ar tratado unidimensionalmente;
- b) as alturas piezométricas ao longo do duto de aeração resultam das perdas de carga locais nas entradas dos dutos de admissão e aeração ( $h_{p1}$  e  $h_{p3}$ ), e das perdas de carga contínuas ao longo destes mesmos dutos ( $h_{p2}$  e

$h_{p4}$ ) acrescidas da altura de velocidade na seção considerada.

Era necessário conhecer as perdas de carga, principalmente na curva ou cotovelo entre a torre e o duto, onde devido à curvatura e à expansão súbita do jato de ar as perdas são mais intensas. Para isto foram investigadas as perdas de carga do fluxo de ar em um modelo de paredes fixas reproduzindo o aerador 1 do vertedouro de Foz do Areia, figura 9. O modelo em escala 1:50 reproduz a torre para admissão do ar localizada na margem direita e a largura total da calha. O duto de aeração foi limitado em sua região superior por uma superfície modelada em acrílico, procurando reproduzir o limite inferior do jato de água, estabelecendo-se uma seção transversal com área de 3564 mm<sup>2</sup>. O ar era succionado por um ventilador. O modelo operou com vazão de ar constante ao longo de todo o circuito, não tendo sido realizados testes com distribuição em marcha.

A partir dos resultados de testes realizados nesse modelo concluiu-se que a perda de carga na entrada da torre pode ser avaliada utilizando-se a equação:

$$h_{p1} = K_{L1} \frac{V_T^2}{2g}$$

sendo:

$K_{L1}$  = coeficiente de perda de carga local;

$V_T$  = velocidade média do ar na torre.

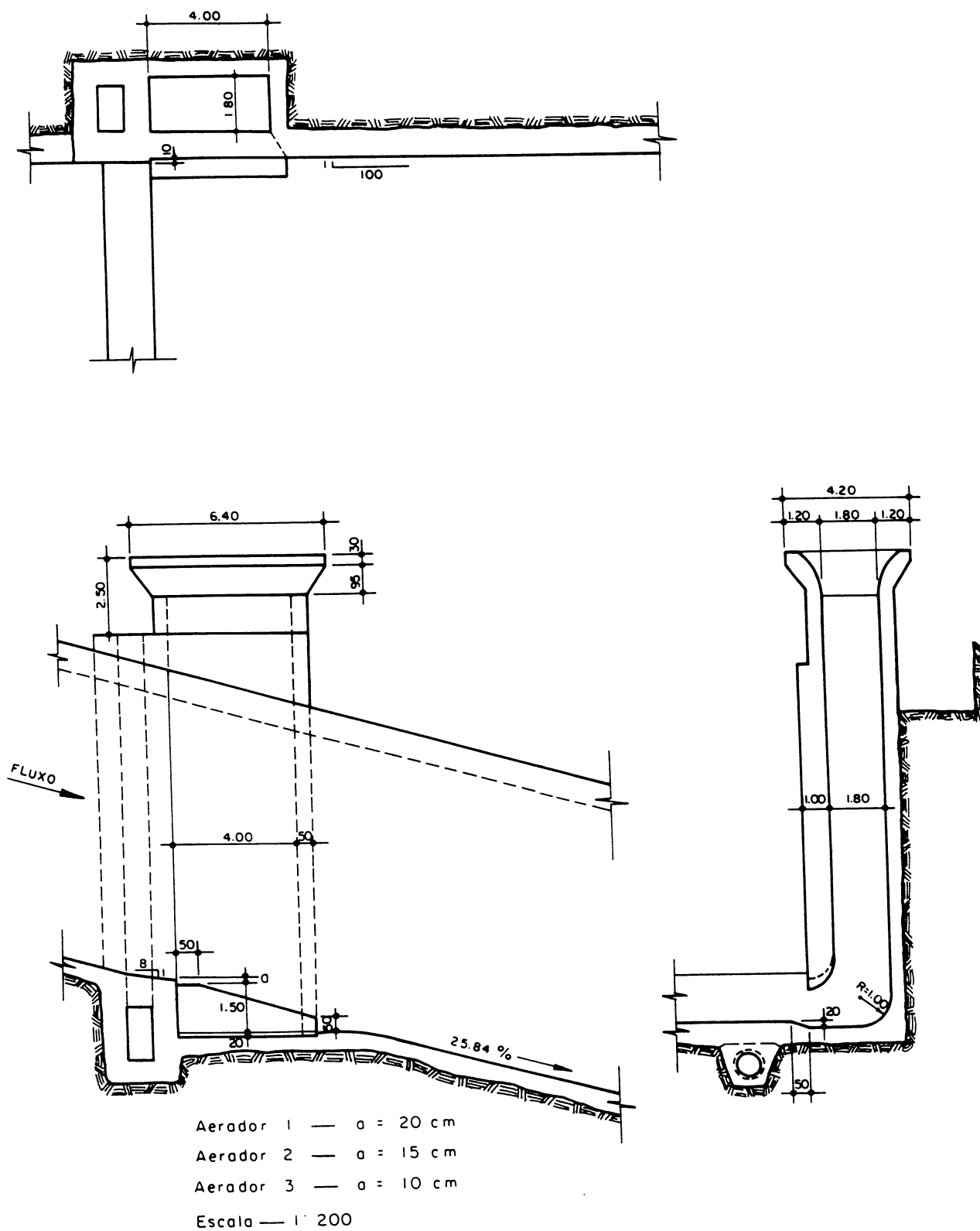


Figura 9 — Aeradores de Foz do Areia .

O coeficiente  $K_{L1}$  é igual a 0,03 para números de Reynolds na torre maiores que 55.000.

Concluiu-se também que a perda de carga local no início do duto de aeração é dada por

$$h_{p3} = K_{L3} \frac{V_E^2}{2g}$$

onde:

$K_{L3}$  = coeficiente de perda de carga local, igual a 0,60;

$V_E$  = velocidade média do ar na seção de entrada do duto de aeração, que tem área de 5,65 m<sup>2</sup>.

A investigação experimental encontrou o valor  $K_{L3} = 0,60$ , entretanto para se obter uma reprodução adequada dos resultados medidos no protótipo de Foz do Areia foi necessário adotar um coeficiente de perda de carga localizada na entrada do duto de aeração menor do que o definido nos testes, 0,47 em vez de 0,60.

Para aplicação do modelo numérico, as perdas de carga contínuas nos dutos de admissão e aeração foram calculadas pela equação de Darcy-Weisbach. A rugosidade de ambos os dutos foi considerada como sendo equivalente à do concreto,  $f = 0,014$ .

Admitiu-se, ainda, que o duto de aeração tem seção de escoamento constante e igual a 5,65 m<sup>2</sup>. No cálculo da perda de carga contínua neste duto considerou-se que a distribuição de

vazões é linear. Velocidades médias foram calculadas pela equação:

$$V_x = \frac{Q_{AR}}{5,65} \left(1 - \frac{x}{B}\right)$$

onde:

$Q_{AR}$  = vazão de ar total no aerador;

$X$  = distância da seção considerada à entrada do duto de aeração;

$B$  = comprimento do duto de aeração.

Para o cálculo de alturas de velocidade no duto de aeração admitiu-se que a velocidade do ar varia linearmente de um máximo no início do duto, onde se aplica um coeficiente de contração igual a 0,74, até zero. Exprimindo-se em forma de equação:

$$V_x = \frac{Q_{AR}}{5,65 \times 0,74} \left(1 - \frac{x}{B}\right).$$

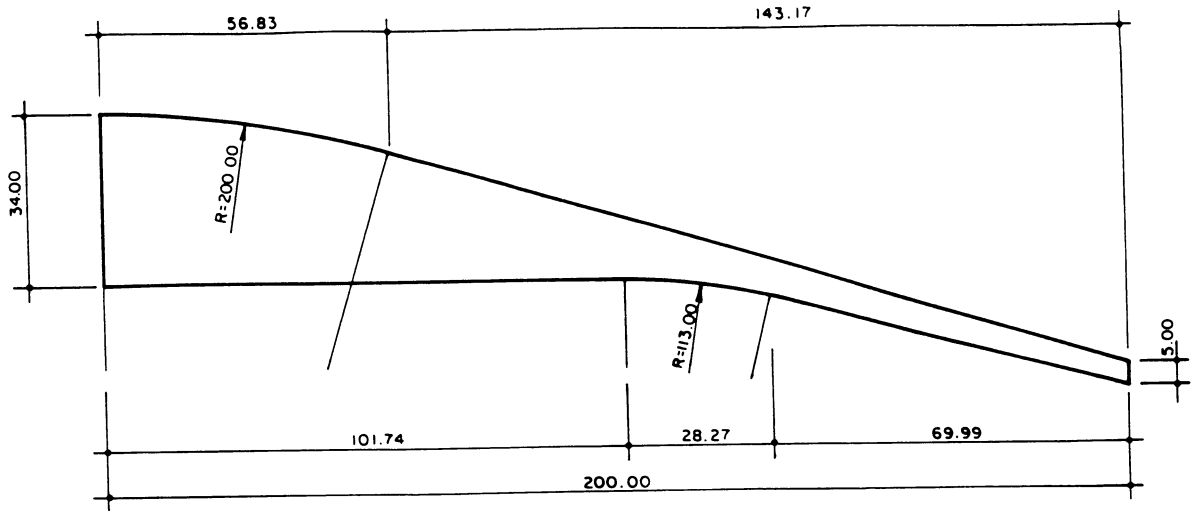
Observa-se que a velocidade tomada para o cálculo da altura de velocidade numa determinada seção é maior que a considerada no cálculo de perda contínua na mesma seção.

A aplicação do modelo numérico permitiu a avaliação da distribuição de pressões sendo conhecida a vazão de ar admitida ao aerador. As parcelas referentes à perda de carga e à altura de velocidade são calculadas individualmente. Somadas resultam na altura piezométrica.

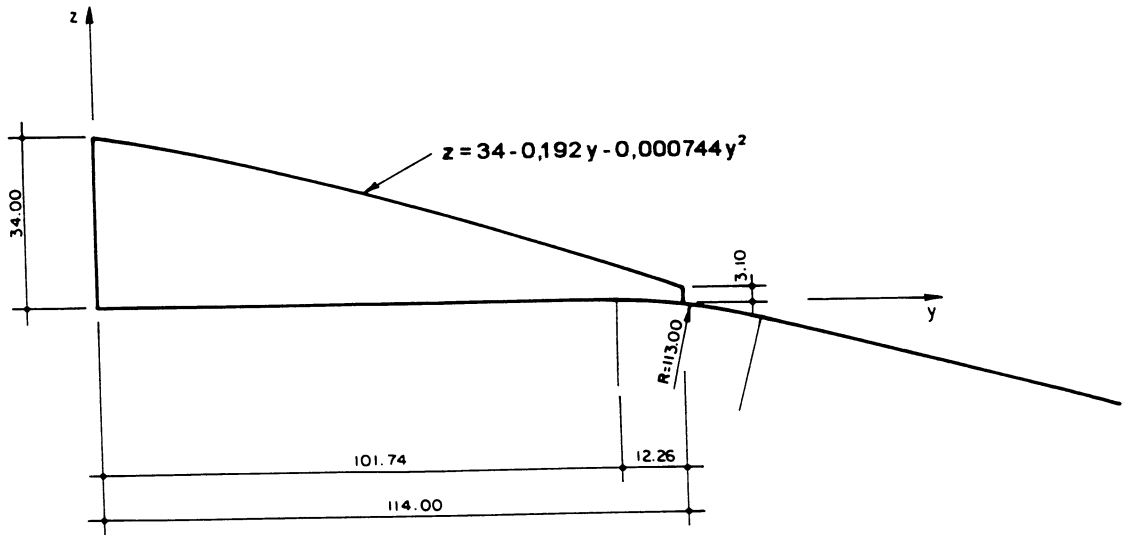
## 1.5 OBJETIVO DO TRABALHO

Nesta dissertação objetivou-se principalmente investigar os dois fatores do escoamento de ar aparentemente responsáveis pela diferença encontrada na investigação experimental de Clóvis M. Ávila (1990), quanto à perda de carga no início do duto de aeração. A perda de carga total indicada pelos resultados de protótipo sugeriu um coeficiente de perda local  $K_{L3} = 0,47$  em vez do valor  $K_{L3} = 0,60$  obtido na investigação experimental. A geometria do modelo testado e as condições simplificadas do escoamento podem explicar esta diferença. O duto de aeração no modelo tinha seção transversal constante, maior que a definida pelos borrifos sob o jato e o modelo não reproduzia o arraste de ar pela água. Aparentemente, a expansão do jato imediatamente a jusante de seção contraída no protótipo é menor que a resultante no modelo fixo em acrílico. Também, o arraste de ar pela água altera significativamente o coeficiente de perda de carga.

Para se verificar a influência de uma nova seção de escoamento a jusante da entrada no duto de aeração sobre a perda de carga, a reprodução da geometria do jato foi alterada da seção do estudo de Clóvis M. Ávila, indicada na figura 10a, para a configuração mostrada na figura 10b. Esta parece reproduzir melhor o vazão formado sob o jato de água, conforme indica a figura 7, obtida a partir de fotografias em modelo seccional.



a- Configuração anterior



b- Configuração atual

Obs.: Dimensões em milímetros

Figura 10 - Seção transversal do duto de aerção

Para analisar a influência da distribuição em marcha do ar no duto de aeração sobre o valor da perda de carga, o dispositivo experimental utilizado por Clóvis M. Ávila foi adaptado para permitir a simulação do efeito de remoção do ar ao longo do duto de aeração.

## 2 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

### 2.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

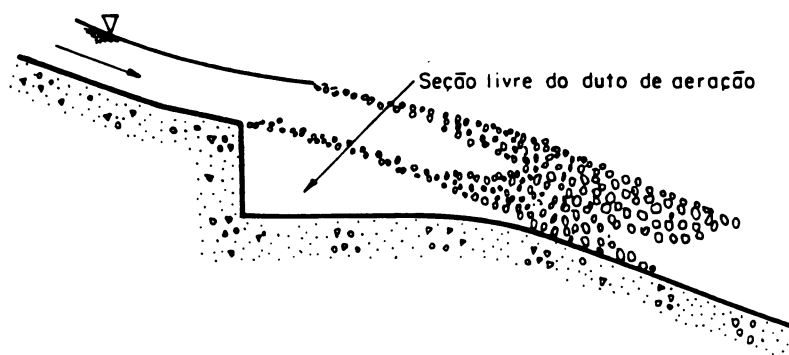
Empregou-se nos estudos um modelo reduzido na escala 1:50 do aerador 1 do vertedouro de Foz do Areia. Neste modelo, o ar é succionado por um ventilador e o controle de vazão é feito por um registro de 3" e uma comporta plana instalados em sua saída.

Para a realização dos estudos apresentados nesta dissertação o modelo foi empregado em três configurações. A cada uma delas correspondeu uma série de 11 testes.

A primeira série de testes visou avaliar a influência da forma da seção transversal do duto de aeração sobre o coeficiente de perda de carga localizada na entrada deste duto, por meio da comparação com resultados obtidos anteriormente por Clóvis M. Ávila. Adotou-se uma superfície de contorno na região superior do duto de aeração definida a partir de fotos de testes em modelo seccional do mesmo aerador, na escala 1:8. Foram traçados perfis do limite inferior da região de borrifos sob o jato, resultando dutos de aeração com as características geométricas apresentadas na tabela 1. A área média é  $5,67 \text{ m}^2$  e o raio hidráulico médio,  $0,41 \text{ m}$ . A pequena variação de forma e de área das seções sob o jato de água permitiu que fosse adotada uma única superfície para todos os testes. De acordo

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO DUTO DE AERAÇÃO NO MODELO EM ESCALA 1:8

VAZÃO DE ÁGUA - PROTÓTIPO (m <sup>3</sup> /s)	RAIO HIDRÁULICO - PROTÓTIPO (m)	ÁREA DO DUTO - PROTÓTIPO (m <sup>2</sup> )
535	0,42	5,08
690	0,40	6,29
850	0,41	5,35
1000	0,42	5,94
1470	0,40	5,96
2090	0,36	6,44
3300	0,38	5,53
538	0,45	5,76
1024	0,45	5,10
1032	0,38	6,03
1804	0,39	5,20
2060	0,41	5,53
2078	0,42	5,54



com A. I. GLASOV (1984) o grau de expansão dos borrifos de água na face inferior do jato é aproximadamente constante para iguais velocidades de água. Ao perfil inferior médio dos jatos foi ajustada uma parábola de 2º grau de equação:

$$z = -0,000744 y^2 - 0,192 y + 34,$$

para  $y$  e  $z$  em mm, ilustrada na figura 10. A área do duto de aeração resultou 2261 mm<sup>2</sup> (equivalente a 5,65 m<sup>2</sup>) e o raio hidráulico, igual a 8,39 mm, equivalendo a 0,42 m no protótipo.

O dispositivo experimental é ilustrado nas figuras 11 e 12. Os testes foram realizados mantendo-se uma vazão constante ao longo do aerador.

Na segunda série de testes procurou-se simular o arraste de ar ao longo do duto de aeração e avaliar seus efeitos sobre o fluxo de ar. A superfície superior do duto de aeração utilizada na série anterior foi mantida. Recebeu, porém, furos de 4 mm de diâmetro, uniformemente distribuídos a 26,5 mm uns dos outros, possibilitando a sucção do ar ao longo do duto de aeração. Externamente à superfície que simula o jato foi instalada uma caixa para permitir a aspiração do ar pelo ventilador, com dimensões suficientes para manter a pressão praticamente constante na face externa do duto de aeração. A saída de ar no muro esquerdo foi vedada, instalando-se uma tomada de pressão nesse local. O aspecto do modelo após as modificações é ilustrado na figura 13.

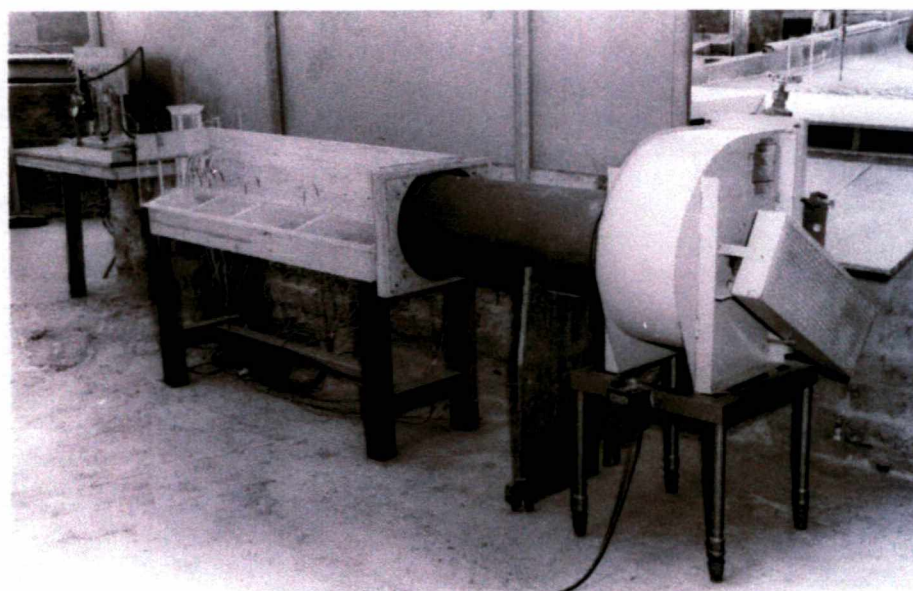
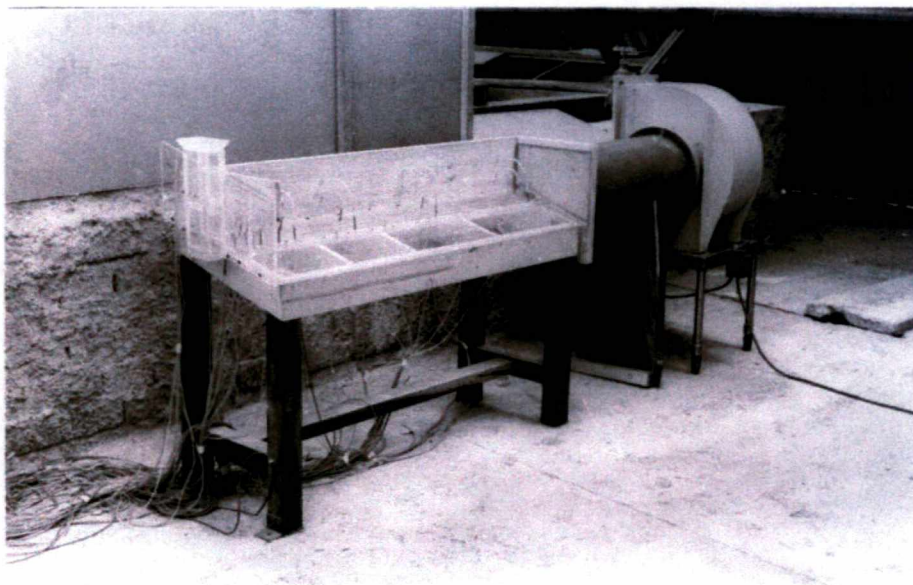


FIGURA 11 - MODELO PREPARADO PARA TESTES DA SÉRIE 1

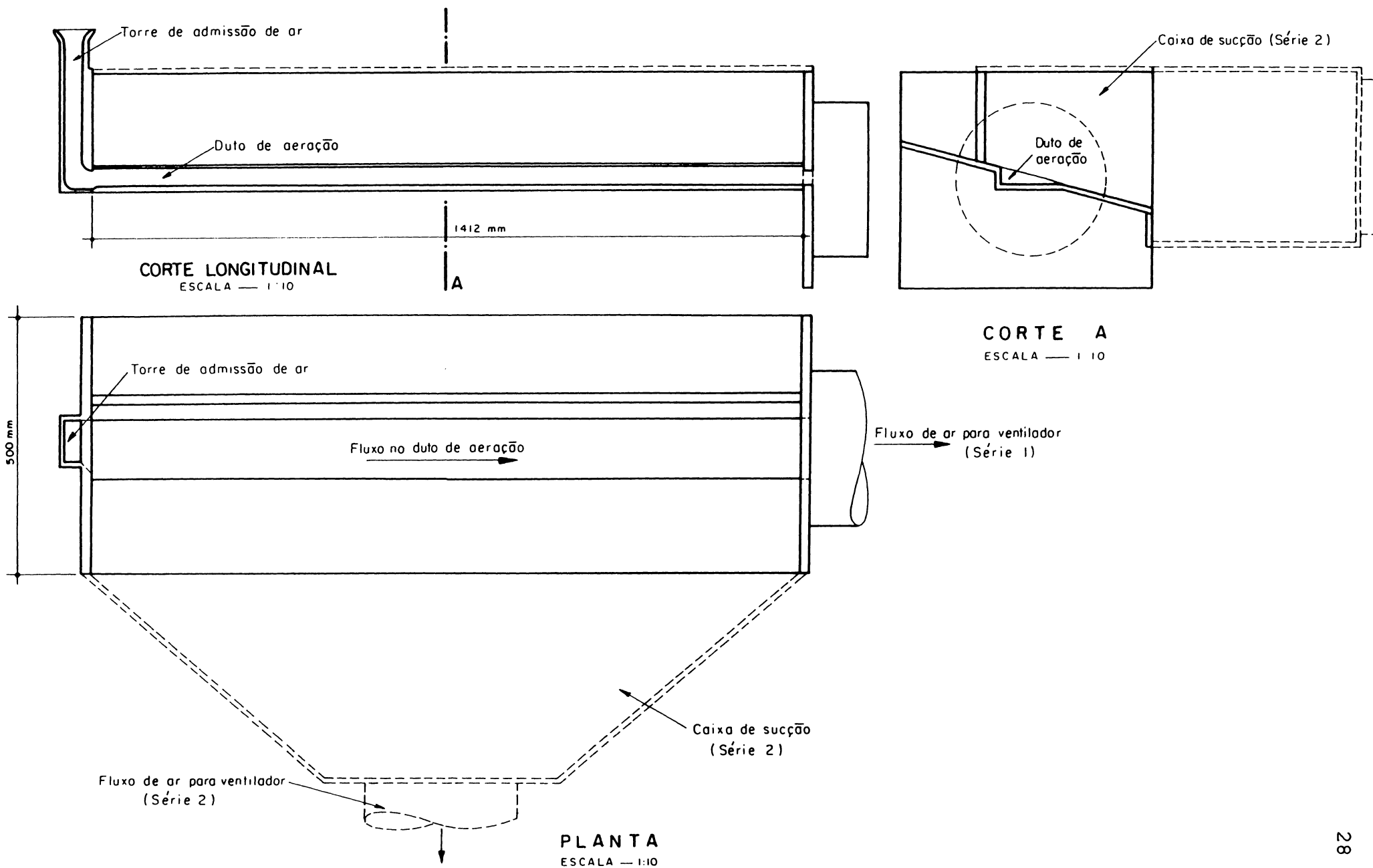


Figura 12 - Modelo reduzido utilizado nos testes das séries 1 e 2

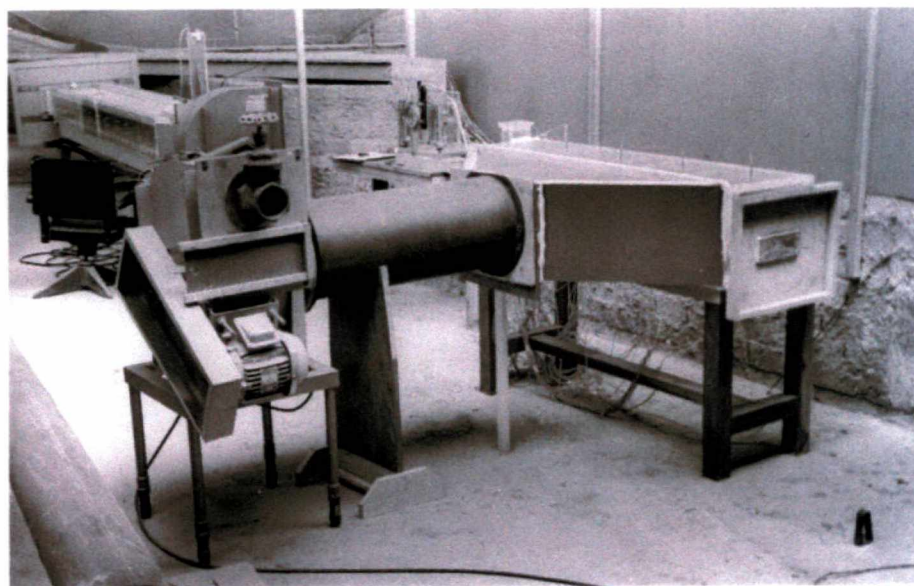
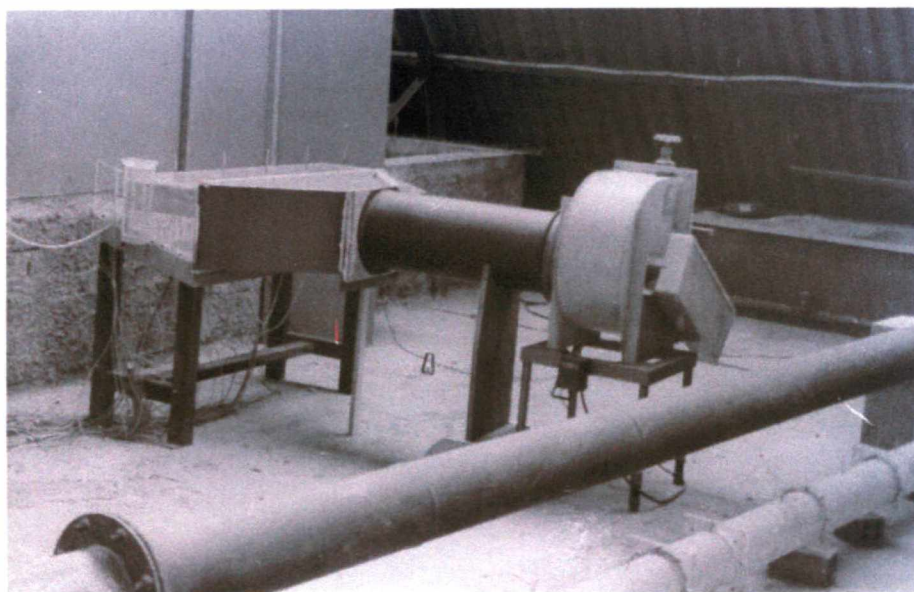


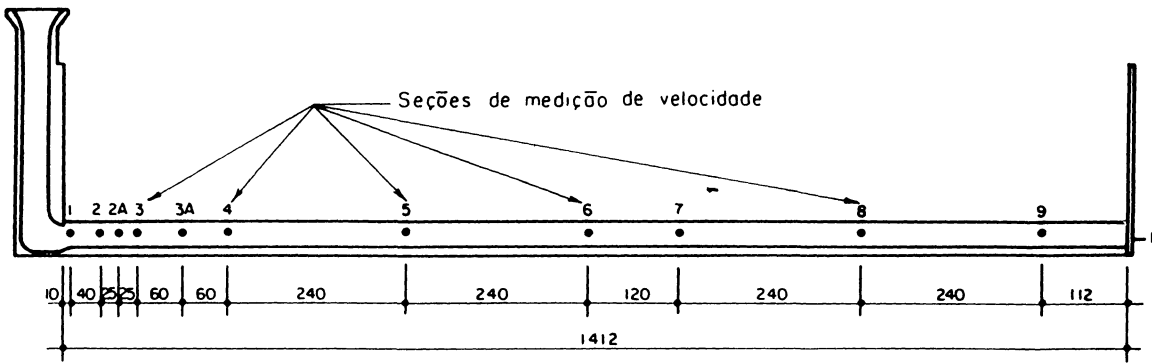
FIGURA 13 - MODELO PREPARADO PARA TESTES DA SÉRIE 2

longo dos dutos de admissão e de aeração, nos testes das séries 1 e 2, o modelo conta com tomadas de pressão distribuídas conforme indicado na figura 14. Alturas de velocidade foram determinadas com auxílio de tubo de estagnação.

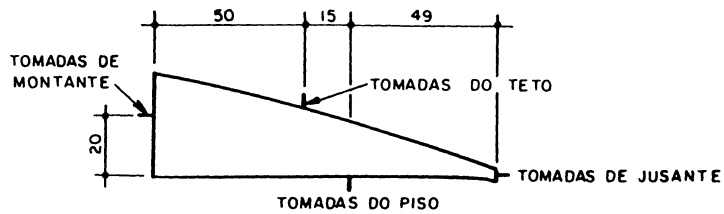
Na terceira série de testes determinou-se a perda de carga contínua no duto de aeração do modelo com distribuição em marcha do ar. Para este fim, o modelo em sua segunda configuração, teve a torre de admissão de ar substituída por um duto retilíneo, com a mesma seção transversal do duto de aeração e colinear a este. O novo duto de admissão tinha comprimento de 1412 mm e emboque em forma elíptica. Desta forma eliminou-se a perda local na entrada do duto de aeração, que se confundia com a perda contínua neste duto. O modelo é apresentado na fotografia da figura 15 e na figura 16. Nesta última constam também as posições das tomadas de pressão E, I e F utilizadas nesta série de testes.

As medidas de pressão foram efetuadas com um manômetro tipo Wahlen, descrito por J. W. HOWE (1950). O equipamento utilizado, ilustrado na figura 17, tem precisão de leitura de 0,01 mm de coluna de líquido manométrico, aproximadamente 7 mm de coluna de ar.

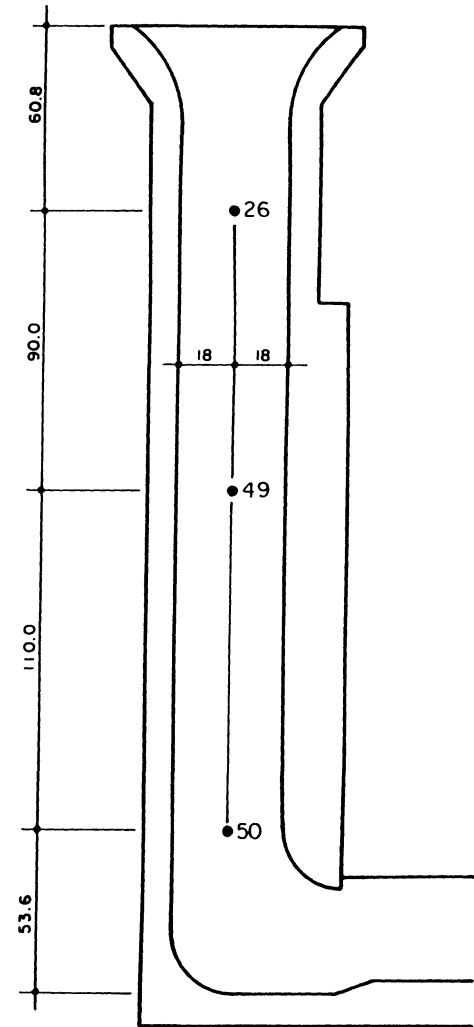
LOCALIZAÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO												
Posição	Distância ao início do duto de aeração (mm)											
	10	50	75	100	160	220	460	700	820	1060	1300	1412
Montante	1	2	2A	3	3A	4	5	6	7	8	9	F
Teto	28	32	36	10	40	44	14	—	18	—	22	—
Jusante	30	34	38	12	42	46	16	—	20	—	24	—
Piso	31	35	39	13	43	47	17	—	21	—	25	—



TOMADAS DE PRESSÃO NA PAREDE VERTICAL DO DUTO DE AERAÇÃO  
ESCALA — 1:10



SEÇÃO TRANSVERSAL DO DUTO DE AERAÇÃO  
ESCALA — 1:2.5



TOMADAS DE PRESSÃO NA TORRE  
ESCALA — 1:2.5

Obs.: Dimensões em milímetros

Figura 14 — Posições das tomadas de pressão

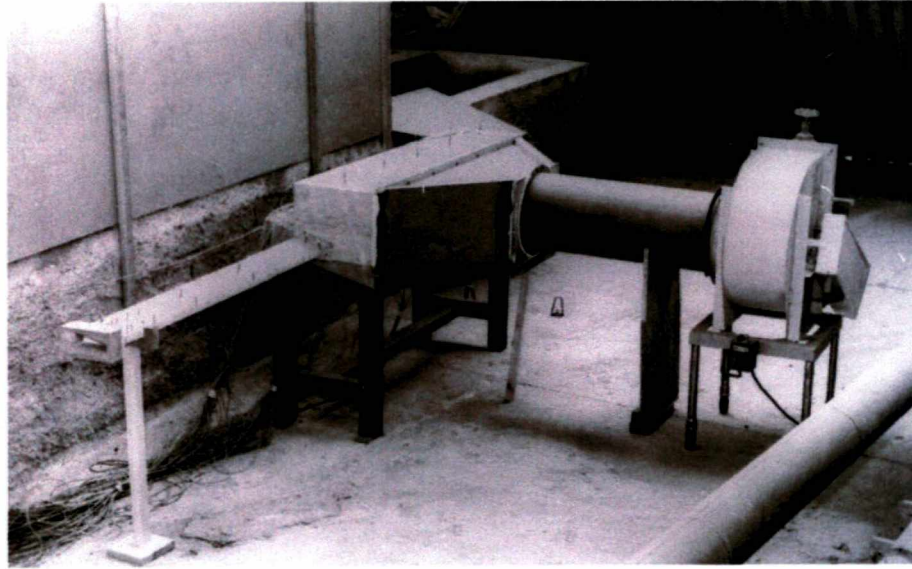


FIGURA 15 - MODELO PREPARADO PARA TESTES DA SÉRIE 3

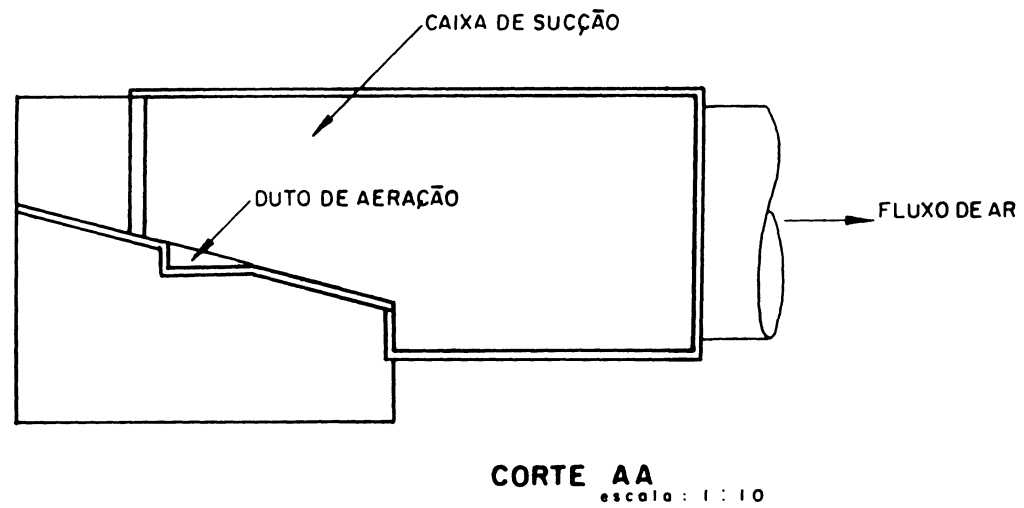
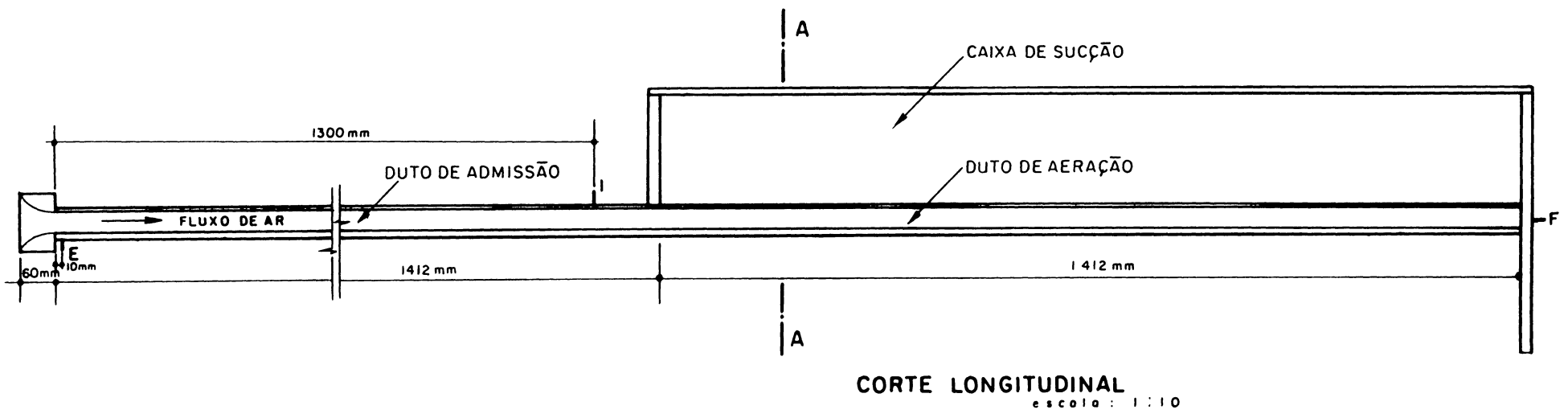


Figura 16 - Modelo Reduzido utilizado nos Testes da Série 3.

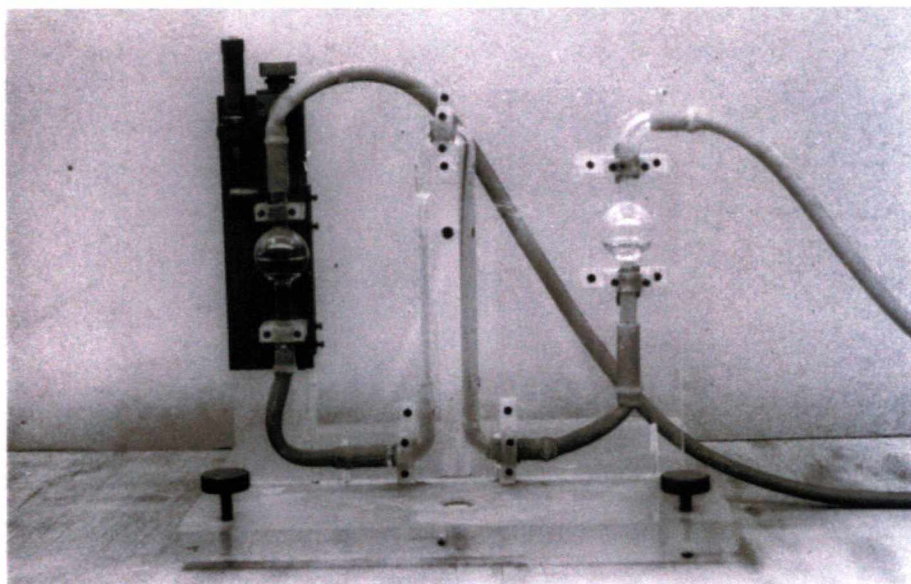


FIGURA 17 - MANÔMETRO TIPO WAHLEN UTILIZADO NOS TESTES

## 2.2 MEDIÇÕES EFETUADAS

### 2.2.1 Alturas Piezométricas

Pressões foram medidas na torre de admissão nas seguintes tomadas de pressão:

- a) tomada 26, permitindo conhecer a vazão de ar através do modelo;
- b) tomada 49, simultaneamente com tubo de estagnação, para se determinar a velocidade do ar na torre;
- c) tomada 50, para avaliação das perdas de carga na torre.

Ao longo do duto de aeração foram determinadas alturas piezométricas em 38 ou 39 pontos, nos testes das séries 1 ou 2, respectivamente.

Constatou-se que as leituras nas quatro tomadas localizadas numa mesma seção tornaram-se semelhantes a partir de uma distância do início do duto de 46 cm nos testes com vazão constante e 16 cm nos testes com distribuição em marcha. Este fato mostra que a sucção de ar no teto reduz o comprimento do trecho de escoamento perturbado pela transição na entrada do duto de aeração.

O anexo 1 apresenta as linhas piezométricas traçadas a partir das medições feitas utilizando-se as tomadas de pressão

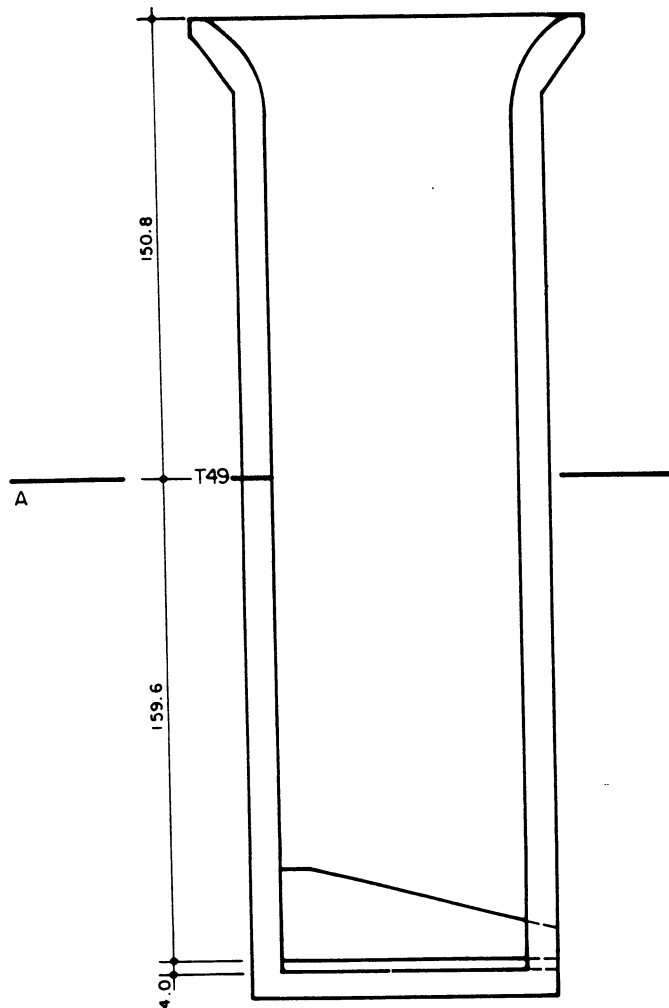
na parede vertical do duto de aeração, para os testes das séries 1 e 2. Os valores da pressão na entrada do duto foram calculados como sendo a soma das perdas de carga na torre com a altura de velocidade na seção.

Nos testes da série 3 foram determinadas alturas piezométricas em três posições, conforme indicado na figura 16. As medidas feitas na tomada próxima à entrada de ar permitiram avaliar as vazões de ar totais através do modelo. As medidas realizadas a 130 cm da entrada de ar no modelo possibilitaram o cálculo da cota da linha de energia no início do duto de aeração. As leituras ao final do duto de aeração representaram as somas de todas as perdas de energia ao longo do modelo.

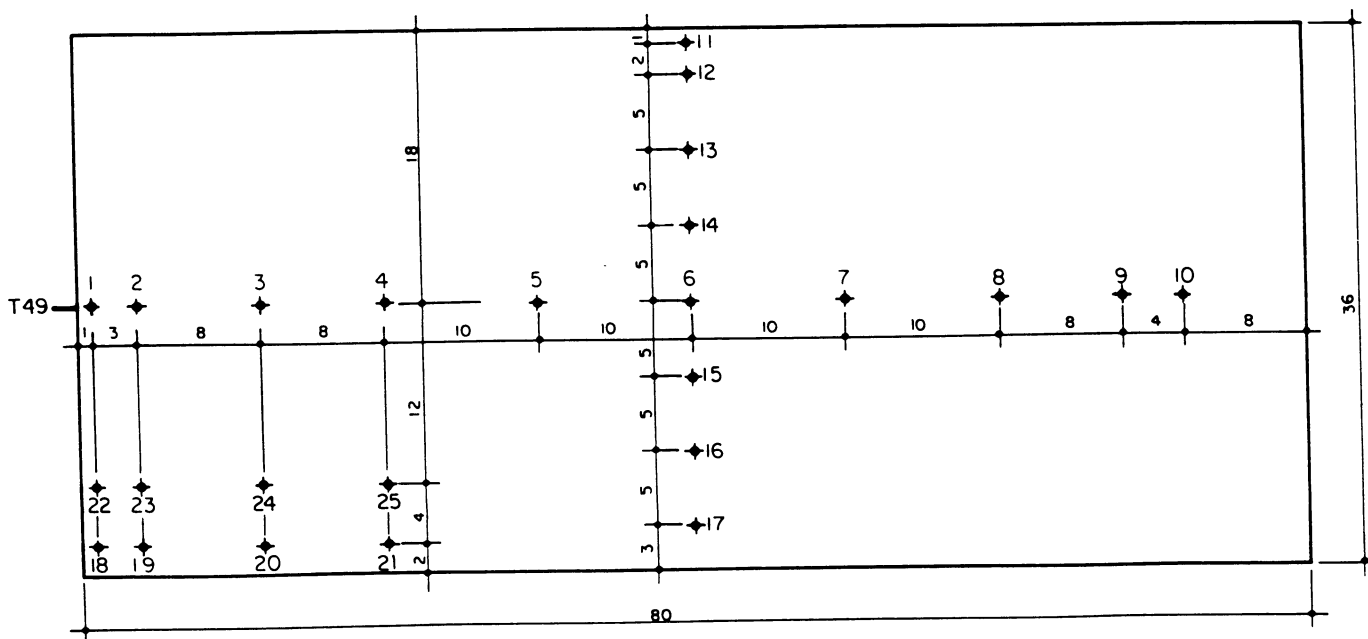
### 2.2.2 Velocidades

Velocidades foram determinadas nos dutos de admissão e de aeração.

No duto de admissão utilizado nos testes das séries 1 e 2 mediram-se velocidades em 25 pontos na seção da tomada 49, cujas posições estão indicadas na figura 18. Estas medições foram feitas ligando-se o manômetro simultaneamente à tomada de pressão 49 e ao tubo de estagnação. Admitiu-se que a altura piezométrica é constante ao longo de toda a seção transversal da torre de admissão, conseqüentemente a leitura no micromanômetro representa a altura de velocidade no ponto de



SEÇÃO DA TORRE  
 ESCALA - 1:2.5  
 DIMENSÕES EM mm



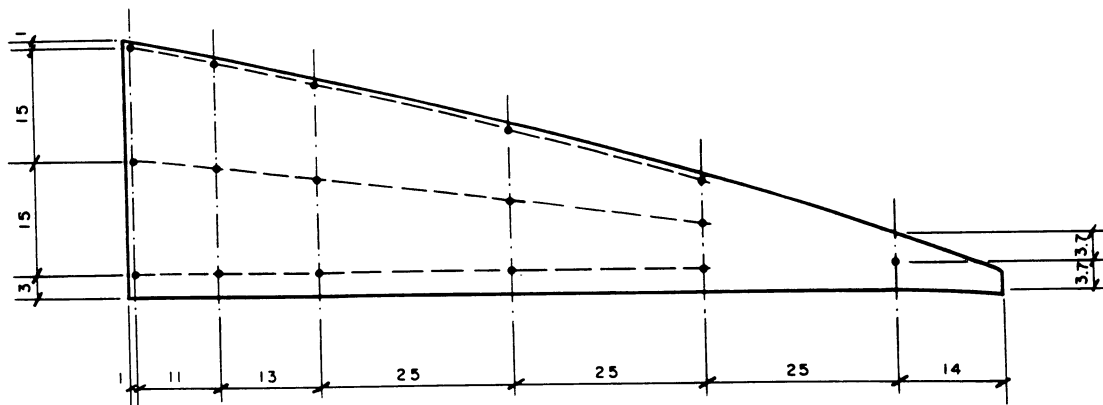
CORTE A - PONTOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE  
 ESCALA - 2:1  
 DIMENSÕES EM mm

Figura 18 - Pontos de medição de velocidade na torre.

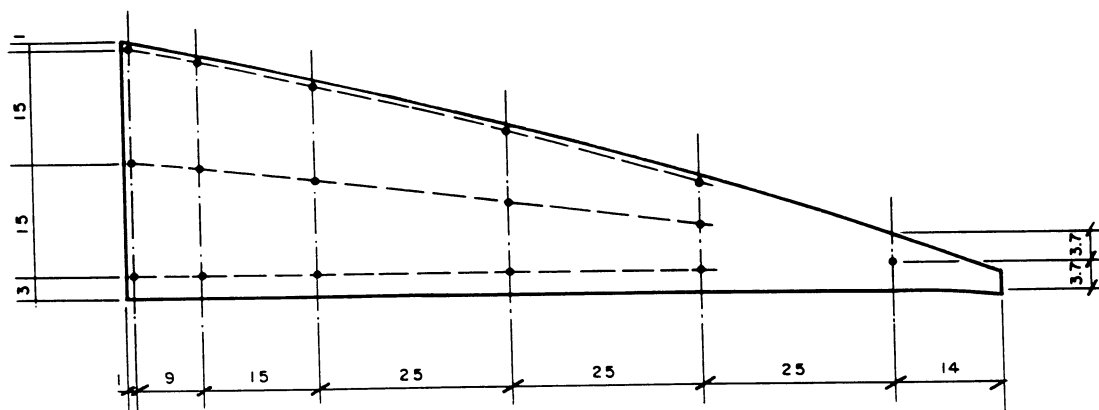
estagnação. A partir das alturas de velocidade foram calculadas velocidades e traçadas as isótacas apresentadas no anexo 2.

Determinaram-se velocidades no duto de aeração nos testes da série 2, realizados com distribuição em marcha do ar. Medições com tubo de estagnação foram efetuadas nas seções transversais localizadas a 10 cm, 22 cm, 46 cm, 70 cm e 106 cm da entrada de ar no duto, denominadas respectivamente de seções 3, 4, 5, 6 e 8, indicadas na figura 14. Foram obtidas cotas da linha de energia nas posições indicadas na figura 19. As diferenças entre cotas das linhas de energia e piezométrica forneceram alturas de velocidade, possibilitando o cálculo de velocidades e o traçado das isótacas apresentadas no anexo 3. As cotas de linhas piezométricas foram avaliadas:

- a) nas seções 4 e 5, fazendo-se a média das pressões lidas nas quatro tomadas de cada seção;
- b) nas seções 6 e 8, por meio das medidas efetuadas na única tomada de cada seção;
- c) na seção 3, considerando-se que a pressão na tomada 12, na extremidade de jusante do jato de água simulado, se estende à região próxima (distante não mais que 20 mm); nas demais posições, calculando-se a média das leituras nas tomadas restantes.



SEÇÃO 3  
escala 1:1



SEÇÕES 4, 5, 6 e 8  
escala 1:1

Observações :

- 1 - Dimensões em milímetros.
- 2 - Numa mesma vertical, o ponto intermediário é equidistante dos pontos superior e inferior.

Figura 19 - Pontos de leitura com tubo de estagnação no duto de aerção.

## 2.3 RESULTADOS OBTIDOS

### 2.3.1 Vazões de Ar

#### 2.3.1.1 Vazão de Ar Total

A torre de admissão do aerador foi calibrada, estabelecendo-se uma relação entre pressões na tomada 26 e vazões de ar. A vazão de ar na torre corresponde à vazão de ar total, tendo em vista que o arraste de ar pela água ocorre somente no duto de aeração.<sup>1</sup> A cada leitura de pressão na tomada 26 determinou-se a correspondente vazão de ar multiplicando-se a velocidade média na torre pela área da seção transversal. A velocidade média foi calculada utilizando-se a média aritmética ponderada das velocidades na seção da tomada 49, representadas por isótacas no anexo 2. Os fatores de ponderação foram determinados por meio de pesagem com precisão de 0,1 mg de recortes de papel dos intervalos compreendidos entre isótacas. A velocidade correspondente a cada peso foi tomada como sendo a média entre os valores das isótacas limites, exceto entre a parede e a isótaca mais próxima. Neste caso a velocidade média no intervalo foi calculada a partir das seguintes equações de perfil de velocidade na camada limite (DAILY e HARLEMAN, 1966):

$$\frac{U - \bar{u}}{u_*} = -5,6 \log \frac{w}{\delta} + 2,5 \quad \text{para } \frac{w}{\delta} < 0,15$$

$$\frac{U - \bar{u}}{u_*} = - 8,6 \log \frac{w}{\delta} \quad \text{para } \frac{w}{\delta} > 0,15$$

onde:

$U$  = velocidade média externa à camada limite;

$\bar{u}$  = velocidade média a uma distância  $w$ ;

$u_*$  = velocidade de corte;

$w$  = distância ao contorno sólido;

$\delta$  = espessura da camada limite.

A velocidade média neste intervalo resultou em média igual a 0,75 vezes o valor da isótaca externa.

Aos pares de valores compostos por pressão na tomada 26 e respectiva vazão foi ajustada uma curva de potência, por meio do método dos mínimos quadrados:

$$Q_{AR} = 10,92 \Delta H^{0,508}$$

exprimindo-se  $Q_{AR}$  em litros por segundo e  $\Delta H$  em milímetros de coluna de água. Desta equação obtiveram-se vazões ajustadas, utilizadas nos cálculos desta dissertação. A tabela 2 apresenta os valores de pressão na tomada 26 e as correspondentes vazões medida e ajustada.

Nos testes da série 3, quando a torre de admissão não se encontrava instalada, as vazões foram determinadas a partir das leituras de pressão na tomada E, cuja posição é apresentada na figura 16, próxima à entrada de ar no modelo, considerando-as iguais às alturas de velocidade. Em forma de equação:

TABELA 2 - VAZÕES DE AR ATRAVÉS DO DUTO DE ADMISSÃO x PRESSÕES NA TOMADA 26

TESTE	VAZÃO DE AR MEDIDA (l/s)	VAZÃO DE AR AJUSTADA (l/s)	PRESSÃO NA TOMADA 26 (mmCA)
1	6,295	6,286	-0,337
2	9,355	9,441	-0,751
3	10,727	10,739	-0,968
4	12,226	12,217	-1,248
5	14,833	14,721	-1,802
6	16,272	16,135	-2,159
7	18,015	18,122	-2,714
8	19,965	19,960	-3,283
9	21,564	21,438	-3,779
10	26,990	27,229	-6,053
11	42,867	42,844	-14,785

$$Q_{AR} = 11,41 \Delta H^{0,5}$$

sendo  $Q_{AR}$  expresso em l/s e  $\Delta H$  em mmCA.

### 2.3.1.2 Vazões de Ar no Duto de Aeração

Nos testes da série 2, em que ocorre distribuição em marcha do ar, foram feitas determinações de vazão ao longo do duto de aeração.

Vazões de ar foram determinadas nas seções 3, 4, 5, 6 e 8 do duto de aeração, distantes 10 cm, 22 cm, 46 cm, 70 cm e 106 cm da entrada de ar no duto. As vazões foram determinadas a partir das isotacas apresentadas no anexo 3. Obtiveram-se velocidades médias nas seções do duto de modo similar ao empregado na torre de admissão, utilizando-se média aritmética ponderada. A velocidade média no intervalo entre o contorno sólido e a isotaca externa, porém, não foi calculada a partir dos perfis de velocidade na camada limite. Seu valor foi tomado como sendo 0,75 vezes o da isotaca externa. As vazões resultantes do produto da velocidade média pela área de escoamento são apresentadas na tabela 3.

Para tornar comparáveis entre si as distribuições de vazão nos testes com distribuição em marcha, dividiram-se as vazões medidas no duto pela correspondente vazão de ar na torre de admissão. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4. A equação de uma parábola de 2º grau, relacionando a razão

TABELA 3 - VAZÕES DE AR NO DUTO DE AERAÇÃO EM l/s  
TESTES COM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA

TESTE	VAZÃO TOTAL (l/s)	SEÇÃO DO DUTO DE AERAÇÃO				
		3	4	5	6	8
1	6,286	6,350	5,631	4,521	3,685	2,015
2	9,441	9,545	8,660	7,188	5,624	3,477
3	10,739	10,251	9,308	7,727	5,860	3,307
4	12,217	11,404	10,530	8,946	6,898	3,809
5	14,721	14,021	13,075	10,874	8,497	4,218
6	16,135	15,346	14,459	11,995	9,671	4,743
7	18,122	16,784	15,729	13,411	10,222	5,026
8	19,960	18,814	17,535	14,179	11,328	5,873
9	21,438	20,528	18,756	16,024	12,515	6,896
10	27,229	26,491	23,985	20,608	16,080	8,679
11	42,844	43,127	37,833	31,388	24,586	13,872

TABELA 4 - VAZÕES DE AR NO DUTO DE AERAÇÃO DIVIDIDAS PELA VAZÃO DE AR NO DUTO DE ADMISSÃO  
TESTES COM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA

TESTE	SEÇÃO DO DUTO DE AERAÇÃO				
	3	4	5	6	8
1	1,010	0,896	0,719	0,586	0,321
2	1,011	0,917	0,761	0,596	0,368
3	0,955	0,868	0,720	0,546	0,308
4	0,933	0,862,	0,732	0,565	0,312
5	0,952	0,888	0,739	0,577	0,287
6	0,951	0,896	0,743	0,599	0,294
7	0,926	0,868	0,740	0,564	0,277
8	0,943	0,879	0,710	0,568	0,294
9	0,958	0,875	0,747	0,584	0,322
10	0,973	0,881	0,757	0,591	0,319
11	1,007	0,883	0,733	0,574	0,324

de vazões à distância da entrada de ar no duto, foi ajustada pelo método dos mínimos quadrados. Impôs-se que junto à entrada de ar no duto a razão de vazões seria 1 e na extremidade oposta, zero. Obteve-se:

$$Q_x/Q_{AR} = 1,000 - 0,492 x - 0,153 x^2$$

sendo  $x$  expresso em metros. Os pares de valores  $(x, Q_x/Q_{AR})$  e a curva ajustada são apresentados graficamente na figura 20.

A taxa de variação de vazão,  $\frac{d(Q_x/Q_{AR})}{dx}$ , cresce com a distância à entrada do duto de aeração. Este fato condiz com o esperado, porque a vazão através dos orifícios no teto deve ser maior no trecho mais distante da torre, onde a diferença entre pressões no duto e na caixa de sucção é maior.

### 2.3.2 Coeficiente de Coriolis

O fator de correção da energia cinética ou coeficiente de Coriolis ( $\alpha$ ) pôde ser determinado a partir das distribuições de velocidade representadas pelas isótacas.

Define-se o coeficiente de Coriolis como sendo:

$$\alpha = \frac{\int_A v^3 dA_s}{V^3 A_s}$$

onde:

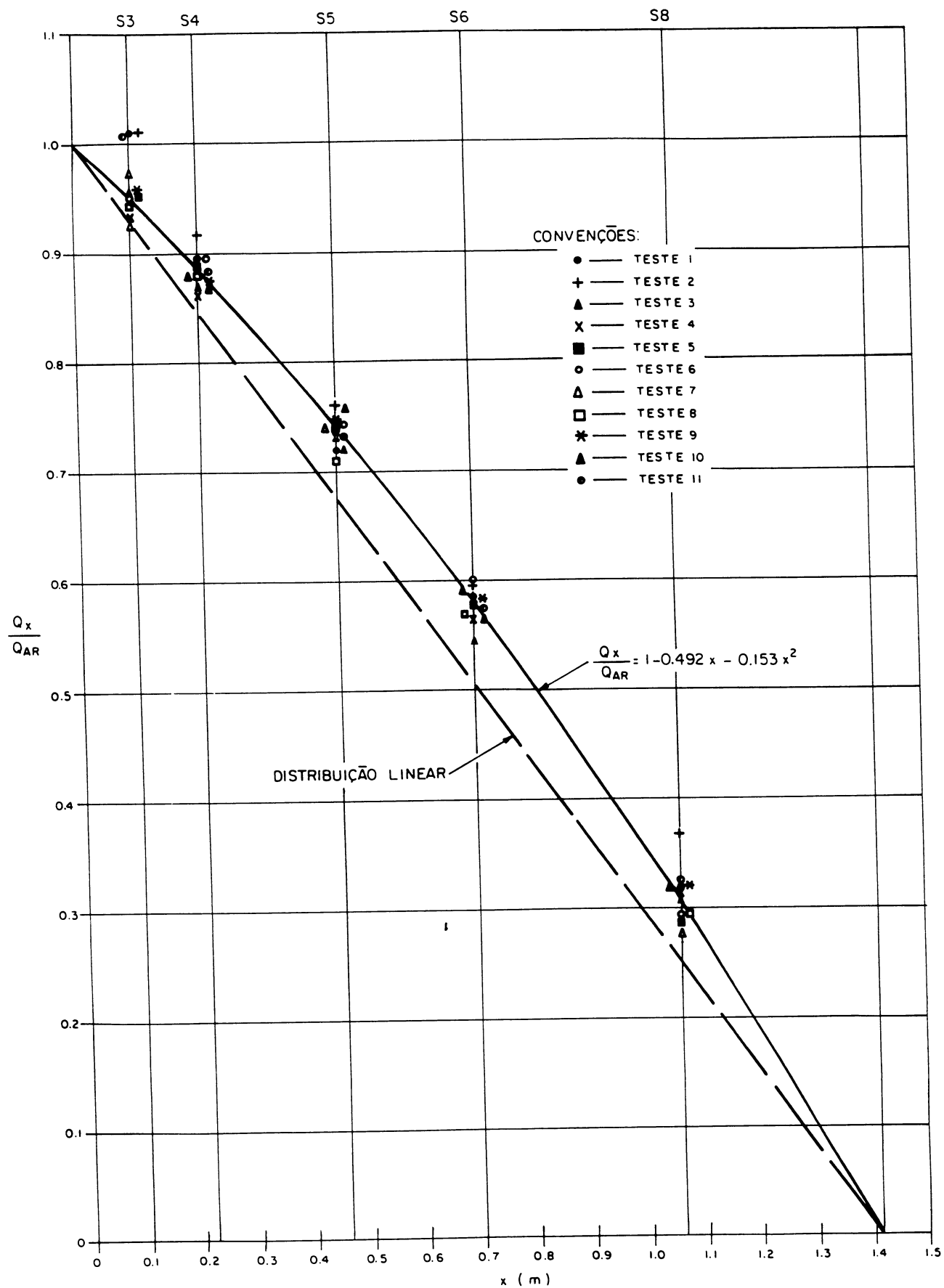


Figura 20 -  $Q_x/Q_{AR}$  ao longo do duto de aeração.

$v$  = velocidade em determinado ponto;

$A_s$  = área da seção de escoamento;

$V$  = velocidade média do ar na seção considerada.

Obteve-se numericamente  $\alpha$  fazendo-se:

$$\alpha = \frac{\sum V_i^3 \Delta A_{si}}{V^3 A_s}$$

onde:

$V_i$  = velocidade média entre duas isótacas (na região próxima ao contorno sólido tomou-se o mesmo valor considerado para o cálculo de velocidade média na seção);

$\Delta A_{si}$  = área compreendida entre as isótacas correspondentes a  $V_i$ .

Os valores do coeficiente de Coriolis foram determinados para a seção da tomada de pressão 49 na torre de admissão e para as seções 3, 4, 5, 6 e 8 do duto de aeração. Estes valores constam da tabela 5. Aos valores médios de  $\alpha$  nas seções do duto do aerador foi ajustada a curva apresentada na figura 21.

### 2.3.3 Perdas de Carga na Torre de Admissão

As perdas de carga na torre de admissão são devidas às perdas contínua e localizada na entrada do ar.

TABELA 5 - COEFICIENTE DE CORIOLIS

TESTE	TORRE	DUTO DE AERAÇÃO				
	SEÇÃO 49	SEÇÃO 3	SEÇÃO 4	SEÇÃO 5	SEÇÃO 6	SEÇÃO 8
1	1,066	1,062	1,092	1,137	1,202	1,200
2	1,068	1,056	1,061	1,086	1,162	1,177
3	1,053	1,071	1,076	1,115	1,229	1,214
4	1,048	1,085	1,077	1,109	1,185	1,246
5	1,039	1,093	1,067	1,101	1,157	1,319
6	1,041	1,072	1,054	1,109	1,132	1,249
7	1,044	1,103	1,079	1,095	1,176	1,385
8	1,039	1,089	1,063	1,149	1,205	1,249
9	1,038	1,063	1,059	1,093	1,162	1,214
10	1,034	1,073	1,089	1,077	1,146	1,286
11	1,034	1,049	1,056	1,101	1,157	1,229
MÉDIA	1,046	1,074	1,070	1,107	1,174	1,252

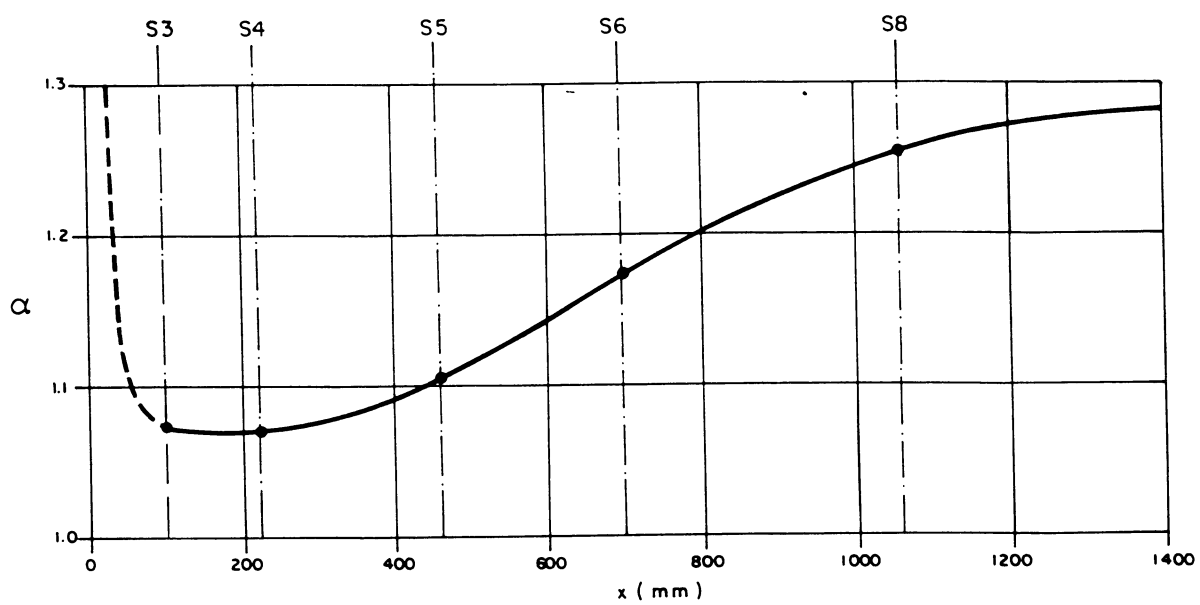


Figura 21 -  $\alpha$  ao longo do duto de aeração .

A perda de carga localizada na entrada da torre,  $h_{p1}$ , e o correspondente coeficiente de perda de carga,  $K_{L1}$ , foram avaliados a partir dos resultados de testes da série 1.

Considerou-se que a pressão lida na tomada 50 era representativa da cota  $f_T$  linha piezométrica ao final da torre. À pressão na tomada 50 relacionou-se a correspondente altura de velocidade calculada utilizando-se o coeficiente de Coriolis obtido anteriormente. Considerou-se preferível empregar este coeficiente, ainda que calculado para a seção da tomada 49, a ignorá-lo. Obteve-se a cota da linha de energia, ou seja, a soma das perdas de carga até o final da torre.

A perda de carga contínua na torre,  $h_{p2}$ , foi calculada utilizando-se a equação:

$$h_{p2} = f_T \frac{T}{4R_{hT}} \frac{V_T^2}{2g}$$

onde:

$f_T$  = fator de resistência da torre, calculado por meio da equação de Blasius;

$T$  = comprimento do início da torre à tomada de pressão 50 = 0,2608 m;

$R_{hT}$  = raio hidráulico da torre = 0,0124 m;

$V_T$  = velocidade média na torre.

A equação de Blasius pode ser escrita como:

$$f_T = \frac{0,3164}{R_T^{0,25}}$$

onde:

$$\begin{aligned} R_T &= \text{número de Reynolds do escoamento na torre} = \\ &= \frac{4V_T R_{HT}}{v} \end{aligned}$$

sendo:

$$v = \text{viscosidade cinemática do ar} = 15,13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

A diferença entre a perda total de energia e a perda contínua é a perda localizada na entrada da torre ( $h_{p1}$ ). Dividindo-se esta perda pela altura de velocidade na torre obtém-se o coeficiente de perda de carga localizada  $K_{L1}$ .

A tabela 6 apresenta os valores utilizados e obtidos nos cálculos do coeficiente  $K_{L1}$ . Na figura 22 é apresentado um gráfico do coeficiente  $K_{L1}$  contra o número de Reynolds na torre. Neste gráfico, a linha contínua e os pontos referem-se aos resultados obtidos nesta dissertação. A linha tracejada foi definida por Clóvis M. Ávila em seus estudos (1990).

Segundo I. E. IDEL'CIK (1969), para as características geométricas do modelo e para o número de Reynolds na torre maior que 10.000, o valor do coeficiente de perda de carga localizada seria 0,03. Nos testes verificou-se que o coeficiente  $K_{L1}$  decresce à medida que aumenta o número de

TABELA 6 - PERDAS DE CARGA NA TORRE

TESTE	VAZÃO DE AR AJUSTADA (l/s)	COTA DA L.P. NA T.50 (mCAR)	$\alpha \frac{V_T^2}{2g}$ (mCAR)	PERDAS NA TORRE (mCAR)	PERDAS CONTÍNUAS NA TORRE (mCAR)	PERDAS LOCAIS NA TORRE (mCAR)	$K_{L1}$	$R_T$
1	6,286	-0,343	0,259	0,084	0,044	0,040	0,166	7.163
2	9,441	-0,752	0,585	0,167	0,089	0,078	0,142	10.759
3	10,739	-0,956	0,746	0,210	0,112	0,098	0,138	12.238
4	12,217	-1,226	0,961	0,265	0,140	0,125	0,136	13.922
5	14,721	-1,751	1,384	0,367	0,194	0,173	0,130	16.775
6	16,135	-2,087	1,665	0,422	0,228	0,193	0,121	18.387
7	18,122	-2,605	2,107	0,498	0,280	0,218	0,108	20.651
8	19,960	-3,079	2,544	0,535	0,331	0,204	0,083	22.745
9	21,438	-3,561	2,931	0,630	0,375	0,254	0,090	24.430
10	27,229	-5,597	4,711	0,886	0,570	0,316	0,069	31.029
11	42,844	-13,339	11,663	1,676	1,261	0,415	0,037	48.823

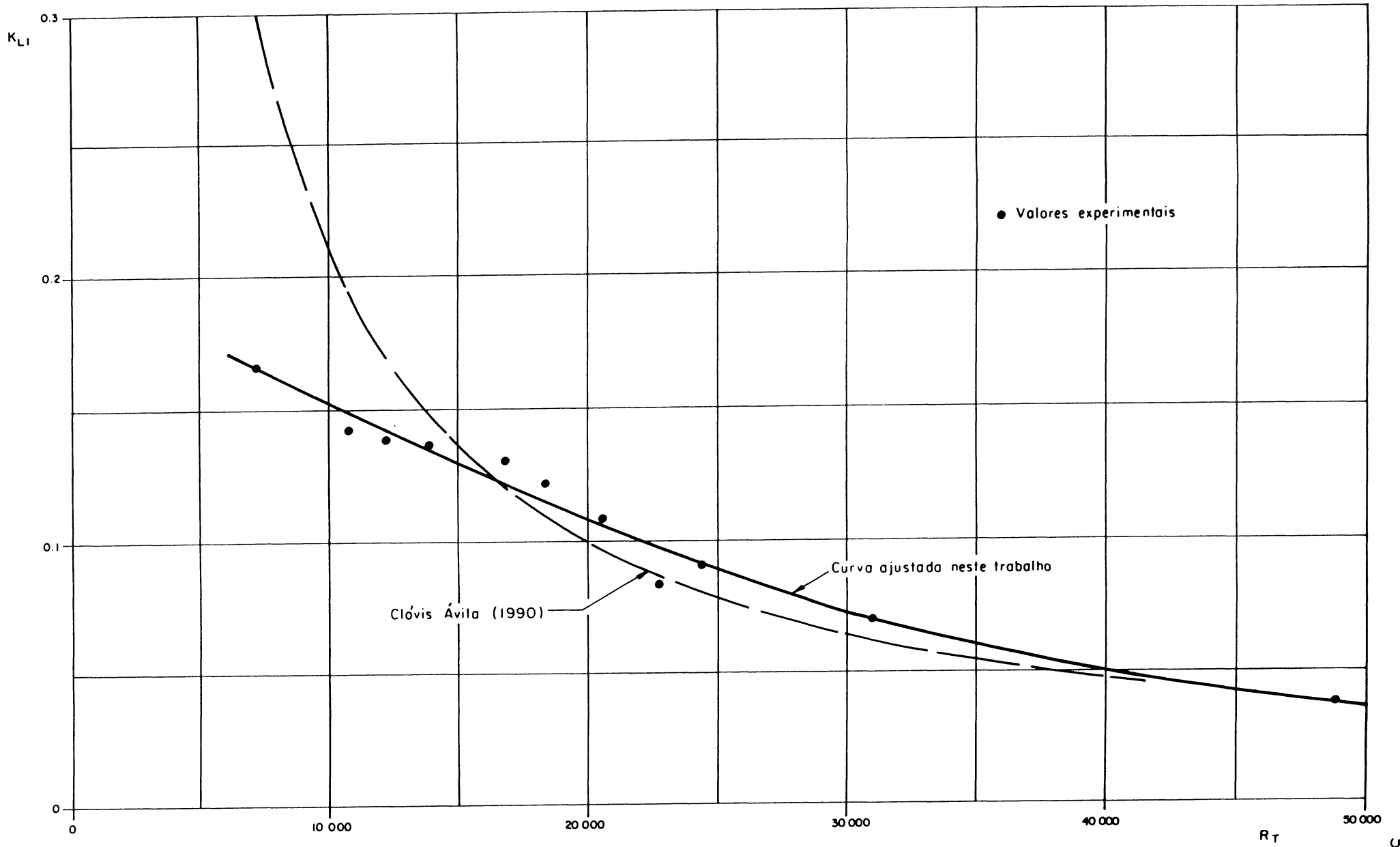


Figura 22 - Coeficiente  $K_{L1}$  em função do número de Reynolds na torre .

Reynolds na torre, até por volta de 50.000. Levando-se em consideração que no protótipo os números de Reynolds são muito elevados, da ordem de  $10^6$ , adotou-se o valor limite sugerido por I. E. IDEL'CIK,  $K_{L1} = 0,03$ .

#### 2.3.4 Perda de Carga Contínua no Duto de Aeração

Em cada um dos testes sem distribuição em marcha foi ajustada uma reta às cotas piezométricas ao longo da parede vertical do duto de aeração. O ajuste foi feito por meio do método dos mínimos quadrados, desconsiderando-se leituras de pressão perturbadas pela curva e contração na entrada do duto. O coeficiente angular desta reta multiplicado pelo comprimento total do duto representou a perda de carga contínua no teste considerado. O correspondente fator de resistência  $f_D$  foi obtido

$$h_{p4} = f_D \frac{B}{4R_{hd}} \frac{V_D^2}{2g}$$

$$f_D = \frac{h_{p4} \cdot 4R_{hd}}{B} \cdot 2g$$

onde:

$h_{p4}$  = perda de carga contínua em metros de coluna de ar;

$B$  = comprimento total do duto = 1,412 m;

$R_{hd}$  = raio hidráulico do duto =  $8,3911 \times 10^{-3}$  m;

$V_D$  = velocidade média do ar no duto.

O fator de resistência pode ser obtido teoricamente utilizando-se a lei de Blasius:

$$f_D = \frac{0,3164}{R_D^{0,25}}$$

onde:

$$R_D = \text{número de Reynolds no duto} = \frac{4V_D R_{hd}}{v}$$

A tabela 7 apresenta os valores da perda de carga contínua, os fatores de resistência obtidos dos testes e por meio da lei de Blasius e valor do número de Reynolds no duto. No gráfico da figura 23, que apresenta valores de  $f_D$ , observa-se boa concordância entre valores de modelo e obtidos teoricamente por meio da lei de Blasius.

Os testes de série 3 permitiram a determinação das perdas de carga contínuas no duto de aeração com distribuição em marcha do ar. Estas perdas de carga são as diferenças entre as cotas das linhas de energia no início e no final do duto de aeração. As cotas das linhas de energia no início do duto de aeração foram calculadas somando-se as pressões na tomada I, localizada a 130 cm da entrada de ar, com as perdas contínuas desta posição ao início do duto de aeração e alturas de velocidade no duto. As perdas no trecho entre a tomada de pressão I e o início do duto de aeração foram calculadas por meio das equações de Darcy-Weisbach e Blasius. As cotas das linhas de energia ao final do duto de aeração são determinadas diretamente na respectiva tomada de pressão.

Os cálculos e as perdas contínuas no duto de aeração são apresentados na tabela 8.

TABELA 7 - FATOR DE RESISTÊNCIA NO DUTO DE AERAÇÃO  
TESTES SEM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA

TESTE	VAZÃO DE AR AJUSTADA (l/s)	PERDA CONTÍNUA NO DUTO (mCAR)	$f_D$	$R_D$	$f_{TEÓRICO}$	DIFERENÇA PERCENTUAL ENTRE $f_D$ E $f_{TEÓRICO}$
1	6,286	0,595	0,0359	6.167	0,0357	-0,6
2	9,441	1,174	0,0314	9.262	0,0323	2,7
3	10,739	1,517	0,0314	10.535	0,0312	-0,4
4	12,217	1,869	0,0299	11.985	0,0302	1,3
5	14,721	2,556	0,0281	14.442	0,0289	2,6
6	16,135	3,073	0,0281	15.829	0,0282	0,2
7	18,122	3,866	0,0281	17.778	0,0274	-2,4
8	19,960	4,509	0,0270	19.582	0,0267	-0,9
9	21,438	5,208	0,0270	21.031	0,0263	-2,8
10	27,229	8,180	0,0263	26.716	0,0247	-5,9
11	42,844	18,989	0,0247	42.032	0,0221	-10,4

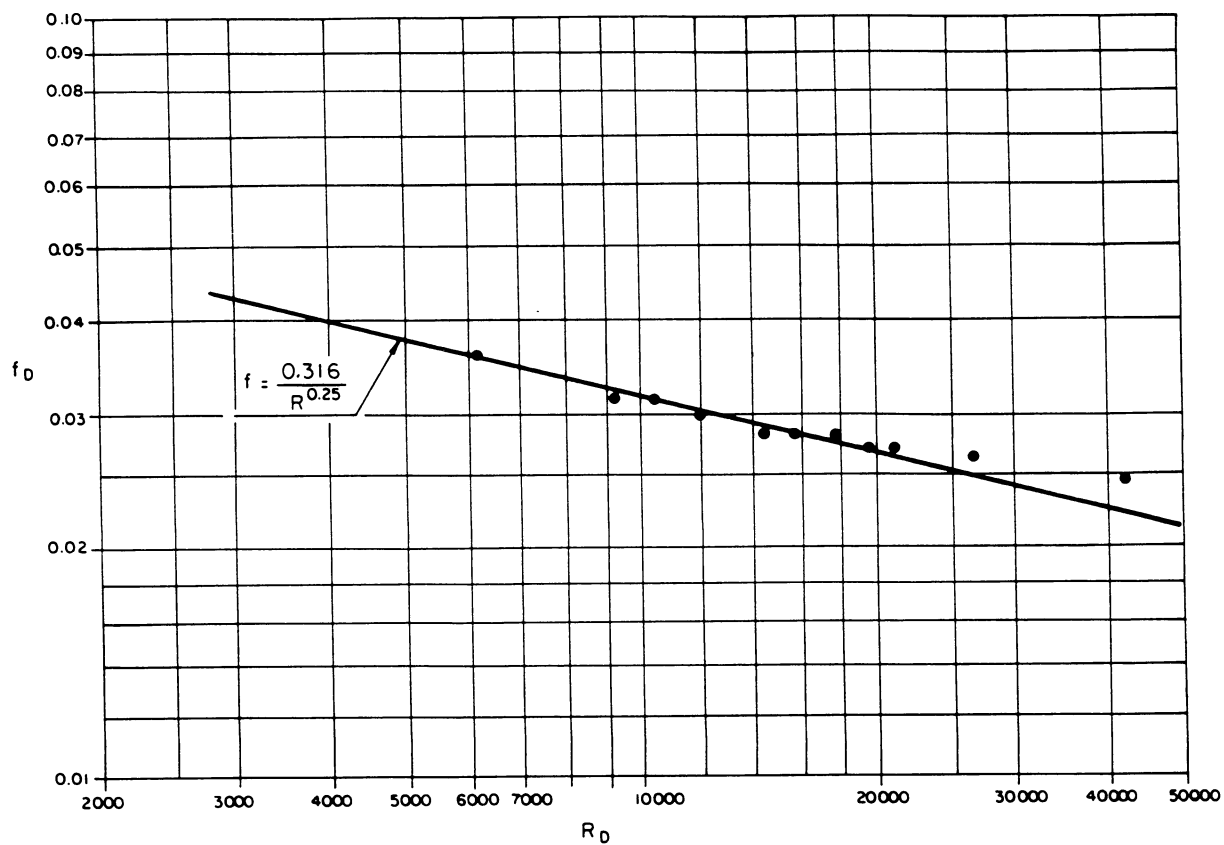


Figura 23 - Fator de resistência no duto em função do número de Reynolds no duto.

TABELA 8 - PERDA DE CARGA NO DUTO DE AERAÇÃO

## TESTES DA SÉRIE 3

TESTE	VAZÃO DE AR AJUSTADA  (l/s)	PRESSÃO NA TOMADA INTERMEDIÁRIA  (mCAR)	PERDA CONTÍNUA  (mCAR)	$\frac{V_b^2}{2g}$  (mCAR)	COTA DA L.E. NO INÍCIO DO DUTO DE AERAÇÃO. (mCAR)	COTA DA L.E. NO FINAL DO DUTO DE AERAÇÃO (mCAR)	$h_{p4}$  (mCAR)
1	6,286	-0,989	-0,047	0,394	-0,642	-0,850	0,208
2	9,441	-2,081	-0,096	0,889	-1,288	-1,707	0,419
3	10,739	-2,653	-0,120	1,150	-1,623	-2,154	0,531
4	12,217	-3,371	-0,150	1,488	-2,033	-2,719	0,686
5	14,721	-4,800	-0,208	2,161	-2,847	-3,774	0,927
6	16,135	-5,701	-0,244	2,596	-3,350	-4,419	1,069
7	18,122	-7,049	-0,299	3,274	-4,074	-5,437	1,363
8	19,960	-8,478	-0,355	3,972	-4,860	-6,434	1,574
9	21,438	-9,731	-0,402	4,582	-5,551	-7,342	1,791
10	27,229	-15,219	-0,610	7,392	-8,437	-11,468	3,031
11	42,844	-35,686	-1,349	18,301	-18,734	-25,647	6,913

### 2.3.5 Perda de Carga Localizada no Início do Duto de Aeração

A perda localizada no início do duto de aeração é devida à curva de  $90^\circ$  no pé da torre e à variação da seção de escoamento.

O coeficiente de perda de carga localizada no início do duto de aeração,  $K_{L3}$ , foi obtido para as séries 1 e 2 de testes empregando-se um único raciocínio. Obteve-se a cota da linha de energia ao final do duto de aeração e considerou-se que ela equivalia à soma de todas as perdas de energia ocorridas no escoamento do ar através do aerador. Dessa cota subtraíram-se as perdas na torre de admissão e contínua no duto de aeração, obtendo-se a perda de energia localizada no início do duto de aeração. O coeficiente de perda de carga localizada na entrada do duto de aeração é o resultado de divisão da perda de energia nesta posição pela altura de velocidade calculada com relação à área da entrada do duto.

Nos testes com vazão constante ao longo do aerador a cota da linha piezométrica ao final do duto de aeração foi obtida extrapolando-se a reta ajustada às leituras de pressão. Essa cota somada à altura de velocidade no duto mede a cota da linha de energia no final do duto de aeração. As demais etapas para o cálculo do coeficiente  $K_{L3}$  foram efetuadas conforme descrito anteriormente. Os valores obtidos constam da tabela 9. O valor médio de  $K_{L3}$  é 0,371 e o desvio padrão amostral,

TABELA 9 - COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA LOCALIZADA NA ENTRADA DO DUTO DE AERAÇÃO

TESTES SEM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA

TESTE	VAZÃO DE AR AJUSTADA (l/s)	$\frac{v_D^2}{2g}$ (mCAR)	COTA DA L.P. NO FINAL DO DUTO (mCAR)	COTA DA L.E. NO FINAL DO DUTO (mCAR)	PERDAS NA TORRE (mCAR)	PERDA CONTÍNUA NO DUTO (mCAR)	PERDA LOCAL NO DUTO (mCAR)	$\frac{v_E^2}{2g}$ (mCAR)	$K_{L3}$	$R_T$	$K_{L3}$ (IDEL'CIK)
1	6,286	0,394	-1,286	-0,892	0,084	0,595	0,213	0,394	0,541	7.163	0,302
2	9,441	0,888	-2,607	-1,719	0,167	1,174	0,378	0,889	0,424	10.758	0,274
3	10,739	1,150	-3,383	-2,233	0,210	1,517	0,506	1,151	0,440	12.238	0,265
4	12,217	1,488	-4,161	-2,673	0,265	1,869	0,539	1,489	0,362	13.922	0,257
5	14,721	2,160	-5,756	-3,596	0,367	2,556	0,673	2,163	0,311	16.775	0,246
6	16,135	2,595	-6,938	-4,343	0,422	3,073	0,848	2,598	0,326	18.387	0,240
7	18,122	3,273	-8,791	-5,518	0,498	3,866	1,154	3,277	0,352	20.651	0,234
8	19,960	3,971	-10,348	-6,377	0,535	4,509	1,333	3,976	0,335	22.745	0,228
9	21,438	4,581	-11,915	-7,334	0,630	5,208	1,496	4,586	0,326	24.430	0,224
10	27,229	7,390	-18,784	-11,394	0,886	8,180	2,328	7,399	0,315	31.029	0,212
11	42,844	18,297	-45,448	-27,151	1,676	18,989	6,486	18,317	0,354	48.823	0,190

0,070. Na última coluna da tabela 9 estão indicados valores de  $K_{L3}$  calculados a partir da fórmula proposta por I. E. IDEL'CIK (1969):

$$K_{L3} = \frac{2,7215}{R_T^{0,25}} + 0,0065$$

Nesta equação a primeira parcela corresponde às perdas devidas à curva e a segunda, à variação de seção de escoamento. O processo para sua obtenção é descrito no anexo 4. Observa-se que os valores obtidos teoricamente por essa equação sempre foram menores do que os obtidos nos testes. Esta diferença é natural, já que estes últimos valores são calculados para uma geometria distinta. A tendência geral à redução do coeficiente com o aumento da vazão parece, entretanto, confirmada.

Os cálculos para obtenção do coeficiente  $K_{L3}$  nos testes da série 2, com distribuição em marcha do ar, foram realizados na seqüência acima exposta. A cota da linha de energia no final do duto foi obtida diretamente da tomada de pressão aí localizada. A perda contínua no duto considerada é a medida nos testes da série 3. Os valores obtidos estão indicadas na tabela 10. A média dos valores de  $K_{L3}$  resultou 0,238, com desvio padrão amostral de 0,051.

TABELA 10 - COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA LOCALIZADA NA ENTRADA DO DUTO DE AERAÇÃO

TESTES COM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA

TESTE	VAZÃO DE AR AJUSTADA (l/s)	COTA DA L.E. NO FINAL DO DUTO (mCAR)	PERDAS NA TORRE (mCAR)	PERDA CONTÍNUA NO DUTO (mCAR)	PERDA LOCAL NO DUTO (mCAR)	$\frac{V_E^2}{2g}$ (mCAR)	$K_{L3}$
1	6,286	-0,437	0,084	0,208	0,145	0,394	0,368
2	9,441	-0,852	0,167	0,419	0,266	0,889	0,299
3	10,739	-1,019	0,210	0,531	0,278	1,151	0,242
4	12,217	-1,267	0,265	0,686	0,316	1,489	0,212
5	14,721	-1,747	0,367	0,927	0,453	2,163	0,210
6	16,135	-2,046	0,422	1,069	0,555	2,598	0,214
7	18,122	-2,519	0,498	1,363	0,658	3,277	0,201
8	19,960	-3,007	0,535	1,574	0,898	3,976	0,226
9	21,438	-3,436	0,630	1,791	1,015	4,586	0,222
10	27,229	-5,380	0,886	3,031	1,463	7,399	0,198
11	42,844	-12,765	1,676	6,913	4,176	18,317	0,228

### 3 VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

#### 3.1 PARÂMETROS

Nesta dissertação o modelo numérico para cálculo de pressões proposto por Clóvis M. ÁVILA (1990) foi aplicado ao aerador 1 do vertedouro de Foz do Areia, utilizando os parâmetros expostos na seqüência.

##### 3.1.1 Seção Transversal do Duto de Aeração

Admitiu-se que o duto de aeração tem seção transversal constante com área de 5,65 m<sup>2</sup> e raio hidráulico de 0,42 m.

##### 3.1.2 Distribuição de Vazões ao Longo do Duto de Aeração

Considerou-se como válida para o protótipo a distribuição de vazões ao longo do duto de aeração obtida no modelo, representada pela equação:

$$Q_x/Q_{AR} = 1,000 - 0,492x - 0,153x^2$$

onde:

$Q_x$  = vazão de ar no duto de aeração a uma distância  $x$ ;

$Q_{AR}$  = vazão de ar na torre de admissão;

$x$  = distância à entrada de ar no duto de aeração expressa em metros no modelo.

O modelo reproduz a condição de alimentação assimétrica no protótipo (entrada de ar por só uma das torres de admissão) e foi construído na escala 1:50. Portanto, transpondo-se a equação acima ao protótipo com operação assimétrica obtém-se:

$$Q_x/Q_{AR} = 1,000 - (0,492/50)x - (0,153/2500)x^2$$

Para a operação simétrica (entrada de ar pelas duas torres de admissão) obtém-se:

$$Q_x/Q_{AR} = 1,000 - (0,492/25)x - (0,153/625)x^2$$

No cálculo de alturas de velocidade considerou-se que o escoamento no duto de aeração é afetado por um coeficiente de contração que varia linearmente de 0,74 (obtido dos resultados experimentais) a 1,00, proporcionalmente à distância da entrada no duto de aeração de zero a 17,5 metros. Esta última distância foi definida com base nos resultados de modelo, que permitiram estimar a extensão do trecho influenciado pela contração.

### 3.1.3 Coeficiente de Coriolis

O coeficiente de Coriolis numa determinada seção do duto de aeração foi considerado como sendo igual à média dos valores medidos em modelo, na correspondente distância à entrada do duto. Nos casos onde não havia medições na posição considerada, tomou-se o valor do coeficiente na figura 21,

traçada a partir dos valores médios de  $\alpha$ . Nas seções afetadas pelo coeficiente de contração não se levou em conta o coeficiente de Coriolis.

### 3.1.4 Perdas de Carga na Torre de Admissão

As perdas de carga na torre de admissão resultam da perda local na entrada ( $h_{p1}$ ) e da perda contínua ( $h_{p2}$ ).

A perda local é dada por:

$$h_{p1} = K_{L1} \frac{V_T^2}{2g}$$

Tomou-se  $K_{L1} = 0,03$  tendo em vista que o número de Reynolds na torre de admissão, para as vazões consideradas, é superior a 55.000.

A perda contínua é calculada pela equação de Darcy Weisbach:

$$h_{p2} = f_T \frac{T}{4R_{hT}} \frac{V_T^2}{2g}$$

onde:

$f_t$  = fator de resistência na torre de admissão = 0,014;

$T$  = comprimento da torre de admissão = 13,04 m;

$R_{hT}$  = raio hidráulico da torre de admissão = 0,621 m;

$V_T$  = velocidade média na torre de admissão, calculada com relação a uma área de 7,2 m<sup>2</sup>.

### 3.1.5 Perda de Carga Local na Entrada do Duto de Aeração

A perda de carga local na entrada do duto de aeração pode ser calculada como:

$$h_{p3} = K_{L3} \frac{V_E^2}{2g}$$

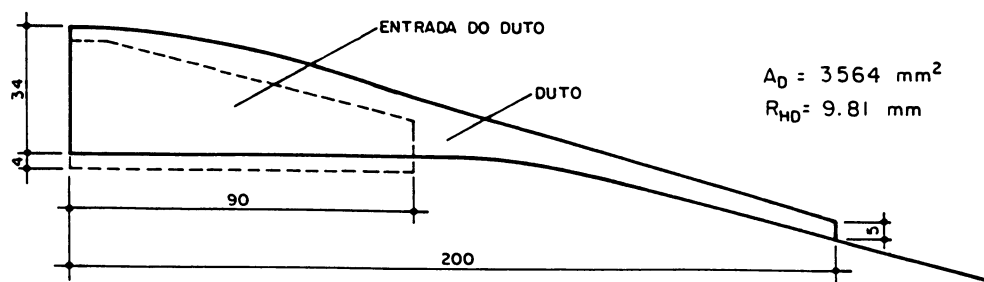
sendo  $V_E$  a velocidade média do ar na entrada do duto de aeração, cuja área vale 5,65 m<sup>2</sup>.

A tabela 11 apresenta valores de  $K_{L3}$  obtidos em três condições do modelo. As condições 1 e 2 referem-se a testes sem distribuição em marcha do ar. As áreas do duto de aeração são 3564 mm<sup>2</sup> e 2261 mm<sup>2</sup> e os valores médios de  $K_{L3}$ , 0,597 e 0,371, respectivamente. A condição 3 corresponde a testes com distribuição em marcha do ar e área e escoamento de 2261 mm<sup>2</sup>, sendo  $K_{L3}$  médio igual a 0,238.

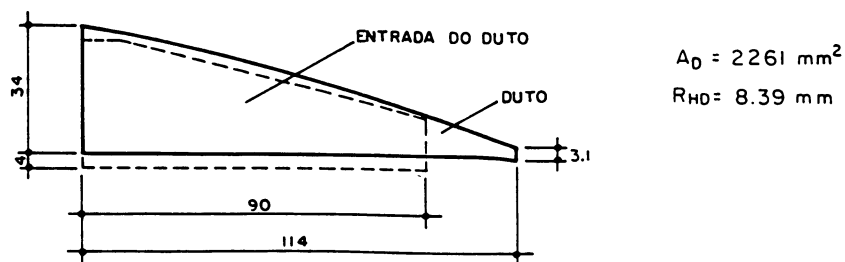
A redução do coeficiente  $K_{L3}$  observada na comparação entre as condições 1 e 2 pode ser explicada pelo menor grau de separação do escoamento a jusante da entrada, com menores efeitos turbulentos e conseqüentemente menor dissipação de energia.

TABELA 11 - COMPARATIVO ENTRE VALORES DE  $K_{L3}$ 

TESTE	VAZÃO DE AR (l/s)	$K_{L3}$		
		CONDIÇÃO 1	CONDIÇÃO 2	CONDIÇÃO 3
1	6,286	0,503	0,541	0,368
2	9,441	0,710	0,424	0,299
3	10,739	0,665	0,440	0,242
4	12,217	0,575	0,362	0,212
5	14,721	0,586	0,311	0,210
6	16,135	0,593	0,326	0,214
7	18,122	0,587	0,352	0,201
8	19,960	0,570	0,335	0,226
9	21,438	0,562	0,326	0,222
10	27,229	0,615	0,315	0,198
11	42,844	-	0,354	0,228



CONDIÇÃO 1 : SEM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA



CONDIÇÃO 2 : SEM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA

CONDIÇÃO 3 : COM DISTRIBUIÇÃO EM MARCHA

Obs.: Dimensões em milímetros

A comparação entre as condições 2 e 3 mostra que a sucção de ar no teto diminui a perda de energia  $h_{p3}$ . A perda de carga local é devida aos efeitos viscosos sobre os vórtices gerados na separação. Ao se aspirar o fluxo perturbado elimina-se em parte este efeito para jusante. A perda de carga  $h_{p3}$  tem um significado diferente, pois não se refere nesta condição à totalidade do fluxo. O comprimento da região perturbada do fluxo é reduzido.

A condição 3 deve ser a que mais se assemelha à que ocorre no protótipo. Adotou-se um coeficiente  $K_{L3}$  igual a 0,214, como a média dos últimos oito valores medidos em modelo, desprezando-se os três primeiros, aparentemente influenciados pelo número de Reynolds do escoamento.

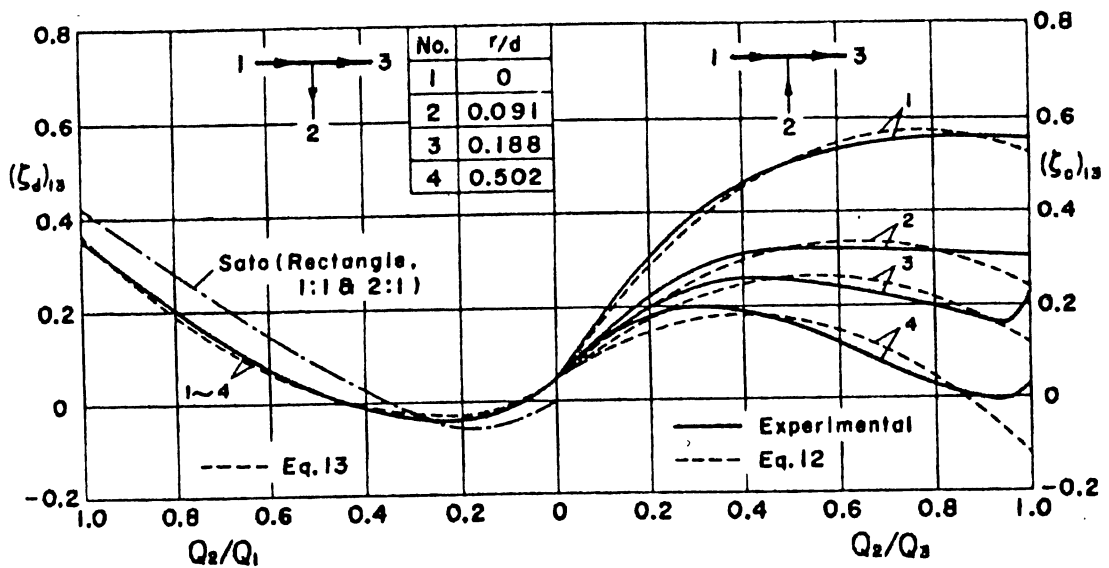
O fenômeno de redução de perda de carga é análogo ao verificado em **manifolds** de eclusas e em conexões em tê, em que parte do escoamento se dá em passagem direta e parte é derivada lateralmente. Estudos feitos por J. S. McNOWN (1954) e H. ITO e K. IMAI (1973) demonstraram que o coeficiente de perda de energia, calculado para a perda entre os trechos a montante e a jusante da saída lateral, diminui e pode ser mesmo negativo, quando o fluido retirado lateralmente vem de uma região com escoamento de baixa velocidade, na qual a energia cinética é menor em relação ao restante do fluxo. O gráfico na figura 24, apresentado por H. ITO e K. IMAI (1973), relaciona o coeficiente de perda de carga  $(\zeta_d)_{13}$  com a razão

entre vazões derivada e total ( $Q_2/Q_1$ ). O coeficiente de perda de carga é definido como sendo:

$$(\zeta_d)_{13} = \frac{\Delta h_{13}}{\frac{V_1^2}{2g}}$$

onde:

$$\Delta h_{13} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{p_3}{\gamma} - \frac{V_3^2}{2g} - \text{perdas contínuas}$$



### Loss Coefficients for Straight-Through Flow in Tees

FIGURA 24 - GRÁFICO APRESENTADO POR H. ITO E K. IMAI (1973)

Observa-se que de  $Q_2/Q_1 = 0$  até  $Q_2/Q_1 = 0,25$  o coeficiente de perda de carga decresce à medida que aumenta a retirada lateral de fluido. O valor negativo se explicaria porque o coeficiente de perda de carga é calculado a partir da diferença entre quantidades de energia média por unidade de peso de quantidades diferentes de fluido. Para o fluido no circuito principal, a jusante da derivação o novo

desenvolvimento da camada limite deve produzir perdas de carga adicionais.

### 3.1.6 Perda de Carga Contínua no Duto de Aeração

A perda de carga contínua no duto de aeração pode ser avaliada por meio da equação de Darcy Weisbach aplicada ao fluxo com distribuição em marcha:

$$h_{p4} = \int_0^x \frac{f_D}{4R_{hd}} \frac{V_x^2}{2g} dx$$

onde:

$f_D$  = fator de resistência do escoamento no duto;

$R_{hd}$  = raio hidráulico no duto de aeração = 0,42 m;

$V_x$  = velocidade média na seção a uma distância  $x$ ;

$X$  = distância da seção transversal à entrada de ar no duto.

O fator de resistência foi obtido a partir de resultados de testes no protótipo do aerador 1 de Foz do Areia, já que os valores de modelo não podem ser transpostos ao protótipo devido à diferente natureza da região superior do duto de aeração. Estes testes foram realizados por funcionários da Copel, proprietária da obra, e do CEHPAR, em julho de 1980 (testes 1 a 7, operação simétrica) e em agosto de 1980 (testes 8 a 13, operação assimétrica). Das cotas piezométricas medidas nas diversas tomadas do protótipo foram

subtraídas as perdas de carga  $h_{p1}$ ,  $h_{p2}$  e  $h_{p3}$  e a altura de velocidade. A diferença é a perda de carga contínua  $h_{p4}$  no duto de aeração, até a seção considerada:

$$h_{p4} = \left( \frac{\Delta p}{\gamma_{AR}} \right)_{PROT} - h_{p1} - h_{p2} - h_{p3} - \alpha \frac{V_D^2}{2g}$$

O valor de  $f_D$  é calculado a partir de:

$$h_{p4} = \frac{f_D}{4R_{hd}2g} \int_0^x V_x^2 dx$$

A equação acima pode ser combinada com as equações que relacionam vazão de ar no duto de aeração do protótipo à distância à entrada de ar neste duto, expostas no item 3.1.2, e com a equação da continuidade. Isolando-se  $f_D$  pode-se escrever para operação assimétrica e simétrica, respectivamente:

$$f_D = 8h_{p4}R_{hd}g A_D^2 / Q_{AR}^2 \int_0^x \left( 1 - \frac{0,492}{50} x - \frac{0,153}{50^2} x^2 \right)^2 dx$$

$$f_D = 8h_{p4}R_{hd}g A_D^2 / Q_{AR}^2 \int_0^x \left( 1 - \frac{0,492}{25} x - \frac{0,153}{25^2} x^2 \right)^2 dx$$

As tabelas 12 a 15 indicam os cálculos efetuados para se obter  $f_D$ .

Os valores médios de  $f_D$  para testes com operação simétrica e assimétrica são respectivamente 0,046 e 0,106. No cálculo das médias não foram levados em conta os valores

TABELA 12 - FATOR DE RESISTÊNCIA  $f_D$  NO DUTO DE AERAÇÃO DO AERADOR 1 DE FOZ DO AREIA

TESTES 5, 4, 3 E 2 - OPERAÇÃO SIMÉTRICA

TESTE	$Q_{AR}$ ( $m^3/s$ )	x (m)	TOMADA	$h_{P1}$ (mCAR)	$h_{P2}$ (mCAR)	$h_{P3}$ (mCAR)	$\alpha$	$\alpha V_D^2/2g$ (mCAR)	$\frac{\Delta p}{\gamma}$ PROT (mCAR)	$h_{P4}$ (mCAR)	$f_D$
5	166,20	5,6	8	-0,815	-1,996	-5,217	1,072	-36,780	-89,838	-45,030	0,345
		11,0	3	-0,815	-1,996	-7,453	1,070	-26,809	-69,874	-32,801	0,145
		17,6	7	-0,815	-1,996	-7,453	1,084	-15,948	-62,387	-36,175	0,119
		23,0	4	-0,815	-1,996	-7,453	1,107	-8,514	-49,910	-31,132	0,092
		29,6	6	-0,815	-1,996	-7,453	1,145	-2,076	-33,273	-20,933	0,059
		35,0	5	-0,815	-1,996	-7,453	1,174	-0,006	-38,264	-27,994	0,078
4	208,65	5,6	8	-1,284	-3,146	-8,223	1,072	-57,968	-106,474	-35,853	0,174
		11,0	3	-1,284	-3,146	-11,747	1,070	-42,253	-129,765	-71,335	0,200
		17,6	7	-1,284	-3,146	-11,747	1,084	-25,135	-70,706	-29,394	0,061
		23,0	4	-1,284	-3,146	-11,747	1,107	-13,419	-65,715	-36,119	0,068
		29,6	6	-1,284	-3,146	-11,747	1,145	-3,271	-37,432	-17,984	0,032
		35,0	5	-1,284	-3,146	-11,747	1,174	-0,010	-53,237	-37,050	0,066
3	236,35	5,6	8	-1,648	-4,036	-10,551	1,072	-74,381	-144,738	-54,122	0,205
		11,0	3	-1,648	-4,036	-15,073	1,070	-54,216	-154,720	-79,747	0,174
		17,6	7	-1,648	-4,036	-15,073	1,084	-32,252	-93,997	-40,988	0,067
		23,0	4	-1,648	-4,036	-15,073	1,107	-17,219	-85,678	-47,702	0,070
		29,6	6	-1,648	-4,036	-15,073	1,145	-4,198	-54,069	-29,114	0,040
		35,0	5	-1,648	-4,036	-15,073	1,174	-0,013	-63,219	-42,449	0,059
2	261,10	5,6	8	-2,011	-4,926	-12,877	1,072	-90,775	-171,357	-60,768	0,188
		11,0	3	-2,011	-4,926	-18,395	1,070	-66,165	-175,516	-84,019	0,151
		17,6	7	-2,011	-4,926	-18,395	1,084	-39,361	-113,129	-48,436	0,065
		23,0	4	-2,011	-4,926	-18,395	1,107	-21,014	-101,483	-55,137	0,066
		29,6	6	-2,011	-4,926	-18,395	1,145	-5,123	-58,228	-27,773	0,032
		35,0	5	-2,011	-4,926	-18,395	1,174	-0,016	-69,874	-44,526	0,050

TABELA 13 - FATOR DE RESISTÊNCIA  $f_D$  NO DUTO DE AERAÇÃO DO AERADOR 1 DE FOZ DO AREIA

TESTES 1, 6 E 7 - OPERAÇÃO SIMÉTRICA

TESTE	$Q_{AR}$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	TOMADA	$h_{P1}$ (mCAR)	$h_{P2}$ (mCAR)	$h_{P3}$ (mCAR)	$\alpha$	$\alpha V_D^2/2g$ (mCAR)	$\frac{\Delta p}{\gamma}$ PROT (mCAR)	$h_{P4}$ (mCAR)	$f_D$
1	308,65	5,6	8	-2,810	-6,884	-17,994	1,072	-126,848	-273,672	-119,136	0,264
		11,0	3	-2,810	-6,884	-25,705	1,070	-92,459	-247,885	-120,027	0,154
		17,6	7	-2,810	-6,884	-25,705	1,084	-55,002	-149,729	-59,328	0,057
		23,0	4	-2,810	-6,884	-25,705	1,107	-29,365	-139,747	-74,983	0,064
		29,6	6	-2,810	-6,884	-25,705	1,145	-7,159	-65,715	-23,157	0,019
		35,0	5	-2,810	-6,884	-25,705	1,174	-0,022	-87,342	-51,921	0,042
6	341,40	5,6	8	-3,438	-8,422	-22,015	1,072	-155,195	-316,095	-127,025	0,230
		11,0	3	-3,438	-8,422	-31,450	1,070	-113,121	-270,345	-113,914	0,119
		17,6	7	-3,438	-8,422	-31,450	1,084	-67,294	-173,852	-63,248	0,049
		23,0	4	-3,438	-8,422	-31,450	1,107	-35,927	-129,765	-50,528	0,035
		29,6	6	-3,438	-8,422	-31,450	1,145	-8,758	-92,333	-40,265	0,027
		35,0	5	-3,438	-8,422	-31,450	1,174	-0,027	-91,501	-48,164	0,032
7	347,95	5,6	8	-3,571	-8,748	-22,868	1,072	-161,208	-324,414	-128,019	0,223
		11,0	3	-3,571	-8,748	-32,668	1,070	-117,503	-249,549	-87,059	0,088
		17,6	7	-3,571	-8,748	-32,668	1,084	-69,901	-149,729	-34,841	0,026
		23,0	4	-3,571	-8,748	-32,668	1,107	-37,319	-145,570	-63,264	0,043
		29,6	6	-3,571	-8,748	-32,668	1,145	-9,098	-83,183	-29,098	0,019
		35,0	5	-3,571	-8,748	-32,668	1,174	-0,028	-95,660	-50,645	0,032

TABELA 14 - FATOR DE RESISTÊNCIA  $f_D$  NO DUTO DE AERAÇÃO DO AERADOR 1 DE FOZ DO AREIA

TESTES 8, 9 E 12 - OPERAÇÃO ASSIMÉTRICA

TESTE	$Q_{AR}$ ( $m^3/s$ )	x (m)	TOMADA	$h_{P1}$ (mCAR)	$h_{P2}$ (mCAR)	$h_{P3}$ (mCAR)	$\alpha$	$\alpha V_D^2/2g$ (mCAR)	$\frac{\Delta p}{\gamma}$ PROT (mCAR)	$h_{P4}$ (mCAR)	$f_D$
8	157,00	5,6	8	-0,727	-1,781	-4,656	1,072	-37,510	-116,456	-71,782	0,579
		17,6	7	-0,727	-1,781	-6,651	1,084	-27,832	-124,774	-87,783	0,258
		29,6	6	-0,727	-1,781	-6,651	1,145	-19,327	-108,138	-79,652	0,162
		35,6	5	-0,727	-1,781	-6,651	1,178	-15,163	-133,093	-108,771	0,200
		47,6	4	-0,727	-1,781	-6,651	1,233	-7,483	-99,820	-83,178	0,136
		59,6	3	-0,727	-1,781	-6,651	1,269	-1,917	-149,729	-138,653	0,218
9	271,90	5,6	8	-2,181	-5,342	-13,964	1,072	-112,505	-266,186	-132,194	0,356
		17,6	7	-2,181	-5,342	-19,948	1,084	-83,477	-291,140	-180,192	0,176
		29,6	6	-2,181	-5,342	-19,948	1,145	-57,968	-257,867	-172,428	0,117
		35,6	5	-2,181	-5,342	-19,948	1,178	-45,479	-266,186	-193,236	0,118
		47,6	4	-2,181	-5,342	-19,948	1,233	-22,444	-241,231	-191,316	0,104
		59,6	3	-2,181	-5,342	-19,948	1,269	-5,748	-274,504	-241,285	0,126
12	300,60	5,6	8	-2,665	-6,529	-17,067	1,072	-137,509	-291,140	-127,370	0,280
		17,6	7	-2,665	-6,529	-24,382	1,084	-102,030	-291,140	-155,534	0,125
		29,6	6	-2,665	-6,529	-24,382	1,145	-70,851	-299,459	-195,032	0,108
		35,6	5	-2,665	-6,529	-24,382	1,178	-55,587	-249,549	-160,386	0,080
		47,6	4	-2,665	-6,529	-24,382	1,233	-27,433	-282,822	-221,813	0,099
		59,6	3	-2,665	-6,529	-24,382	1,269	-7,026	-282,822	-242,220	0,104

TABELA 15 - FATOR DE RESISTÊNCIA  $f_D$  NO DUTO DE AERAÇÃO DO AERADOR 1 DE FOZ DO AREIA

TESTES 10, 11 E 13 - OPERAÇÃO ASSIMÉTRICA

TESTE	$Q_{AR}$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	TOMADA	$h_{P1}$ (mCAR)	$h_{P2}$ (mCAR)	$h_{P3}$ (mCAR)	$\alpha$	$\alpha V_D^2/2g$ (mCAR)	$\frac{\Delta P}{\gamma}$ PROT (mCAR)	$h_{P4}$ (mCAR)	$f_D$
10	384,50	5,6	8	-4,361	-10,683	-27,924	1,072	-224,981	-499,098	-231,149	0,311
		17,6	7	-4,361	-10,683	-39,892	1,084	-166,933	-507,416	-285,547	0,140
		29,6	6	-4,361	-10,683	-39,892	1,145	-115,921	-449,188	-278,331	0,094
		35,6	5	-4,361	-10,683	-39,892	1,178	-90,947	-432,551	-286,668	0,088
		47,6	4	-4,361	-10,683	-39,892	1,233	-44,883	-407,597	-307,778	0,084
		59,6	3	-4,361	-10,683	-39,892	1,269	-11,495	-407,597	-341,166	0,089
11	415,30	5,6	8	-5,087	-12,463	-32,577	1,072	-262,468	-565,644	-253,049	0,292
		17,6	7	-5,087	-12,463	-46,539	1,084	-194,748	-532,371	-273,534	0,115
		29,6	6	-5,087	-12,463	-46,539	1,145	-135,236	-490,780	-291,455	0,085
		35,6	5	-5,087	-12,463	-46,539	1,178	-106,101	-474,143	-303,953	0,080
		47,6	4	-5,087	-12,463	-46,539	1,233	-52,361	-440,870	-324,420	0,076
		59,6	3	-5,087	-12,463	-46,539	1,269	-13,411	-432,551	-355,051	0,080
13	405,30	5,6	8	-4,845	-11,870	-31,027	1,072	-249,980	-540,689	-242,966	0,294
		17,6	7	-4,845	-11,870	-44,325	1,084	-185,482	-	-	-
		29,6	6	-4,845	-11,870	-44,325	1,145	-128,802	-532,371	-324,529	0,104
		35,6	5	-4,845	-11,870	-44,325	1,178	-101,053	-449,188	-287,095	0,079
		47,6	4	-4,845	-11,870	-44,325	1,233	-49,870	-457,506	-346,596	0,085
		59,6	3	-4,845	-11,870	-44,325	1,269	-12,773	-	-	-

correspondentes às duas tomadas de pressão mais próximas da entrada de ar no duto, que se apresentaram sistematicamente mais elevados que os demais, em razão da distorção de fluxo na curva e na mudança de seção.

Levando em conta que o escoamento no duto é em sua maior parte plenamente rugoso, os fatores de resistência 0,046 e 0,106 equivalem, respectivamente, a coeficientes  $K_S$  de Strickler de 48 e 31. Estes valores referem-se à rugosidade média no duto de aeração. É possível calcular a rugosidade da superfície líquida utilizando-se a seguinte expressão, proposta por DAVIS, SORENSEN (1969):

$$\frac{1}{K_{ST}} = \frac{1}{K_{SR}} \left[ \frac{P_R + P_S (K_{SR}/K_{SS})^{3/2}}{P_T} \right]^{2/3}$$

onde:

$K_S$  = coeficiente de Strickler;

T = índice referente à seção total;

R = índice referente à superfície mais rugosa;

S = índice referente à superfície mais lisa;

P = perímetro.

Admitindo-se um coeficiente  $K_S$  de Strickler igual a 80 para o concreto, obtém-se respectivamente para operação simétrica e assimétrica do aerador coeficientes  $K_S$  iguais a 34 e 20. Estes valores indicam que a interface ar-água oferece elevada resistência ao escoamento de ar no duto.

### 3.2 COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE MODELO E DE PROTÓTIPO

As alturas piezométricas no duto de aeração do aerador 1 do vertedouro de Foz do Areia foram determinadas numericamente somando-se perdas de carga e alturas de velocidade, conforme indicado na figura 25. As tabelas 16 a 19 apresentam as pressões obtidas e as parcelas que as compõem, para as diversas vazões de ar dos testes no protótipo. A conversão de unidades de pressão expressas em metros de coluna de ar para centímetros de coluna de água foi feita adotando-se pesos específicos de  $11,8 \text{ N/m}^3$  para o ar e  $9792,3 \text{ N/m}^3$  para a água.

Os valores de pressão na última coluna das tabelas 16 a 19 foram obtidas nos testes realizados em Foz do Areia, citados anteriormente. O aerador era instrumentado com 10 tomadas de pressão, 2 em cada torre de admissão de ar e 6 na parede vertical do duto de aeração. As vazões de ar totais foram calculadas a partir da consideração que as leituras nas tomadas de pressão superiores das torres representam a soma da altura de velocidade com a perda de carga na entrada, ou seja:

$$\frac{\Delta p}{\gamma_{AR}} = 0,03 \frac{V_T^2}{2g} + \frac{V_T^2}{2g}$$

A comparação entre cotas da linha piezométricas obtidas no protótipo e numericamente pode ser feita nas figuras 26 a 32. As pressões medidas no protótipo são representadas por

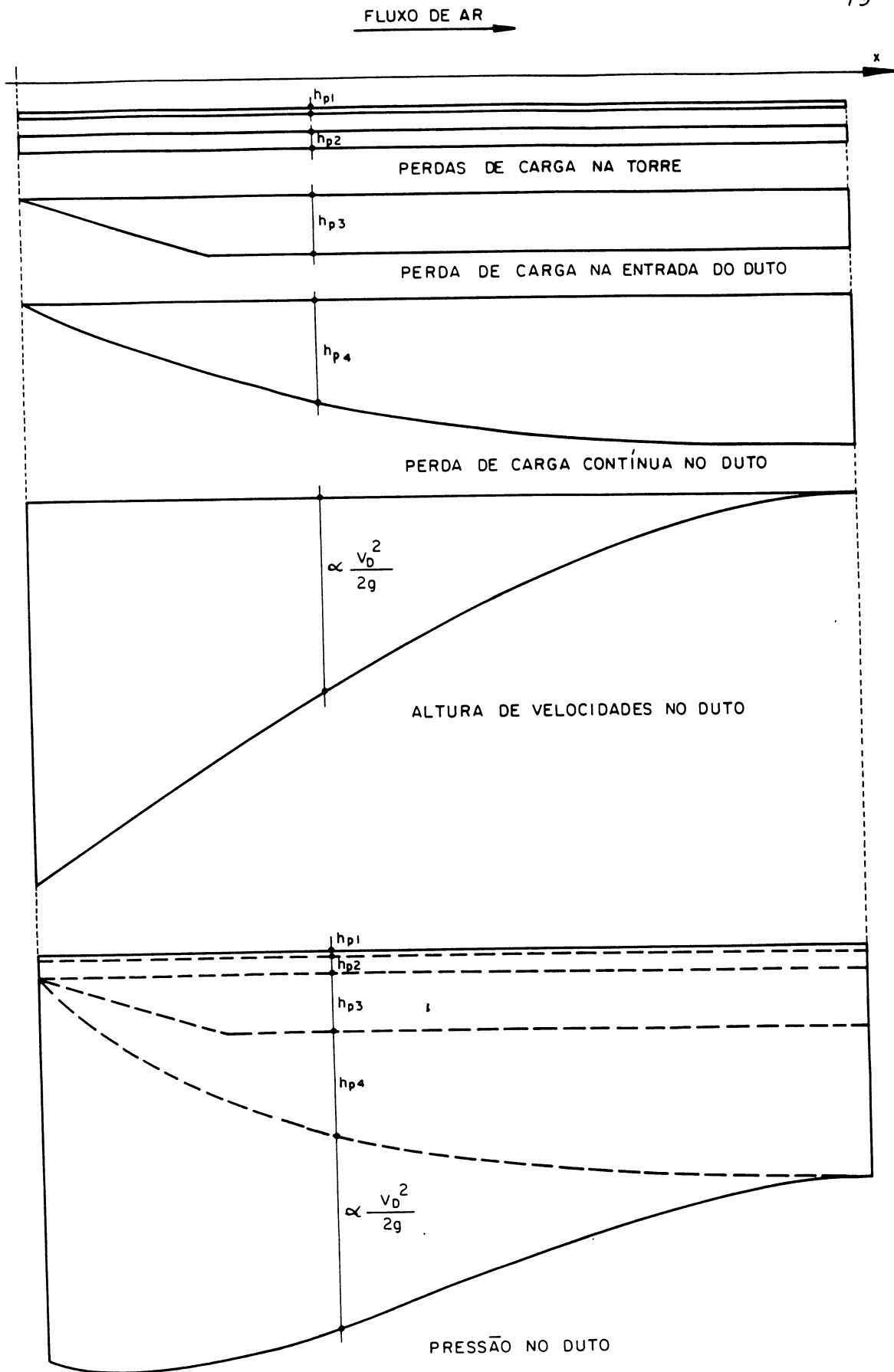


Figura 25 – Composição da distribuição de pressões no modelo proposto.

TABELA 16 - PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO E VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO - TESTES 5, 4, 3 E 2

TESTE	$Q_{AR}$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	TOMADA	$h_{P1}$ (mCAR)	$h_{P2}$ (mCAR)	$h_{P3}$ (mCAR)	$h_{P4}$ (mCAR)	$\alpha V_D^2/2g$ (mCAR)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{MOD}$ (mCAR)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{MOD}$ (cmCA)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{PROT}$ (cmCA)
5	166,20	0,0		-0,815	-1,996	0,000	0,000	-80,538	-83,349	-10,0	
		5,6	8	-0,815	-1,996	-10,496	-5,621	-50,641	-69,569	-8,4	-10,8
		11,0	3	-0,815	-1,996	-10,496	-9,720	-30,712	-53,739	-6,5	-8,4
		17,6	7	-0,815	-1,996	-10,496	-13,060	-15,948	-42,315	-5,1	-7,5
		23,0	4	-0,815	-1,996	-10,496	-14,591	-8,514	-36,412	-4,4	-6,0
		29,6	6	-0,815	-1,996	-10,496	-15,346	-2,076	-30,729	-3,7	-4,0
		35,0	5	-0,815	-1,996	-10,496	-15,436	-0,006	-28,749	-3,5	-4,6
35,3		-0,815	-1,996	-10,496	-15,436	0,000	-28,743	-3,5			
4	208,65	0,0		-1,284	-3,146	0,000	0,000	-126,934	-131,364	-15,8	
		5,6	8	-1,284	-3,146	-16,543	-8,850	-79,814	-109,637	-13,2	-12,8
		11,0	3	-1,284	-3,146	-16,543	-15,319	-48,404	-84,696	-10,2	-15,6
		17,6	7	-1,284	-3,146	-16,543	-20,583	-25,135	-66,691	-8,0	-8,5
		23,0	4	-1,284	-3,146	-16,543	-22,996	-13,419	-57,388	-6,9	-7,9
		29,6	6	-1,284	-3,146	-16,543	-24,186	-3,271	-48,430	-5,8	-4,5
		35,0	5	-1,284	-3,146	-16,543	-24,328	-0,010	-45,311	-5,5	-6,4
35,3		-1,284	-3,146	-16,543	-24,328	0,000	-45,301	-5,5			
3	236,35	0,0		-1,648	-4,036	0,000	0,000	-162,874	-168,558	-20,3	
		5,6	8	-1,648	-4,036	-21,227	-11,367	-102,413	-140,691	-17,0	-17,4
		11,0	3	-1,648	-4,036	-21,227	-19,656	-62,109	-108,676	-13,1	-18,6
		17,6	7	-1,648	-4,036	-21,227	-26,411	-32,252	-85,574	-10,3	-11,3
		23,0	4	-1,648	-4,036	-21,227	-29,507	-17,219	-73,637	-8,9	-10,3
		29,6	6	-1,648	-4,036	-21,227	-31,034	-4,198	-62,143	-7,5	-6,5
		35,0	5	-1,648	-4,036	-21,227	-31,216	-0,013	-58,140	-7,0	-7,6
35,3		-1,648	-4,036	-21,227	-31,216	0,000	-58,127	-7,0			
2	261,10	0,0		-2,011	-4,926	0,000	0,000	-198,772	-205,709	-24,8	
		5,6	8	-2,011	-4,926	-25,906	-13,872	-124,985	-171,700	-20,7	-20,6
		11,0	3	-2,011	-4,926	-25,906	-23,989	-75,798	-132,630	-15,0	-21,1
		17,6	7	-2,011	-4,926	-25,906	-32,232	-39,361	-104,436	-12,6	-13,6
		23,0	4	-2,011	-4,926	-25,906	-36,010	-21,014	-89,867	-10,8	-12,2
		29,6	6	-2,011	-4,926	-25,906	-37,873	-5,123	-75,839	-9,1	-7,0
		35,0	5	-2,011	-4,926	-25,906	-38,096	-0,016	-70,955	-8,6	-8,4
35,3		-2,011	-4,926	-25,906	-38,096	0,000	-70,939	-8,5			

TABELA 17 - PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO E VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO - TESTES 1, 6 E 7

TESTE	$Q_{AR}$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	TOMADA	$h_{P1}$ (mCAR)	$h_{P2}$ (mCAR)	$h_{P3}$ (mCAR)	$h_{P4}$ (mCAR)	$\alpha V_D^2/2g$ (mCAR)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{MOD}$ (mCAR)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{MOD}$ (cmCA)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{PROT}$ (cmCA)
1	308,65	0,0		-2,810	-6,884	0,000	0,000	-277,762	-287,456	-34,6	
		5,6	8	-2,810	-6,884	-36,200	-19,385	-174,653	-239,932	-28,9	-32,9
		11,0	3	-2,810	-6,884	-36,200	-33,522	-105,919	-185,335	-22,3	-29,8
		17,6	7	-2,810	-6,884	-36,200	-45,041	-55,002	-145,937	-17,6	-18,0
		23,0	4	-2,810	-6,884	-36,200	-50,321	-29,365	-125,580	-15,1	-16,8
		29,6	6	-2,810	-6,884	-36,200	-52,924	-7,159	-105,977	-12,8	-7,9
		35,0	5	-2,810	-6,884	-36,200	-53,235	-0,022	-99,151	-11,9	-10,5
		35,3		-2,810	-6,884	-36,200	-53,235	0,000	-99,129	-11,9	
6	341,40	0,0		-3,438	-8,422	0,000	0,000	-339,835	-351,695	-42,4	
		5,6	8	-3,438	-8,422	-44,290	-23,717	-213,683	-239,550	-35,4	-38,0
		11,0	3	-3,438	-8,422	-44,290	-41,013	-129,590	-226,753	-27,3	-32,5
		17,6	7	-3,438	-8,422	-44,290	-55,106	-67,294	-178,550	-21,5	-20,9
		23,0	4	-3,438	-8,422	-44,290	-61,566	-35,927	-153,643	-18,5	-15,6
		29,6	6	-3,438	-8,422	-44,290	-64,751	-8,758	-129,659	-15,6	-11,1
		35,0	5	-3,438	-8,422	-44,290	-65,132	-0,027	-121,309	-14,6	-11,0
		35,3		-3,438	-8,422	-44,290	-65,132	0,000	-121,282	-14,6	
7	347,95	0,0		-3,571	-8,748	0,000	0,000	-353,000	-365,319	-44,0	
		5,6	8	-3,571	-8,748	-46,006	-24,636	-221,961	-304,922	-36,7	-39,0
		11,0	3	-3,571	-8,748	-46,006	-42,602	-134,610	-235,537	-28,4	-30,0
		17,6	7	-3,571	-8,748	-46,006	-57,241	-69,901	-185,467	-22,3	-18,0
		23,0	4	-3,571	-8,748	-46,006	-63,951	-37,319	-159,595	-19,2	-17,5
		29,6	6	-3,571	-8,748	-46,006	-67,260	-9,098	-134,683	-16,2	-10,0
		35,0	5	-3,571	-8,748	-46,006	-67,655	-0,028	-126,008	-15,2	-11,5
		35,3		-3,571	-8,748	-46,006	-67,655	0,000	-125,980	-15,2	

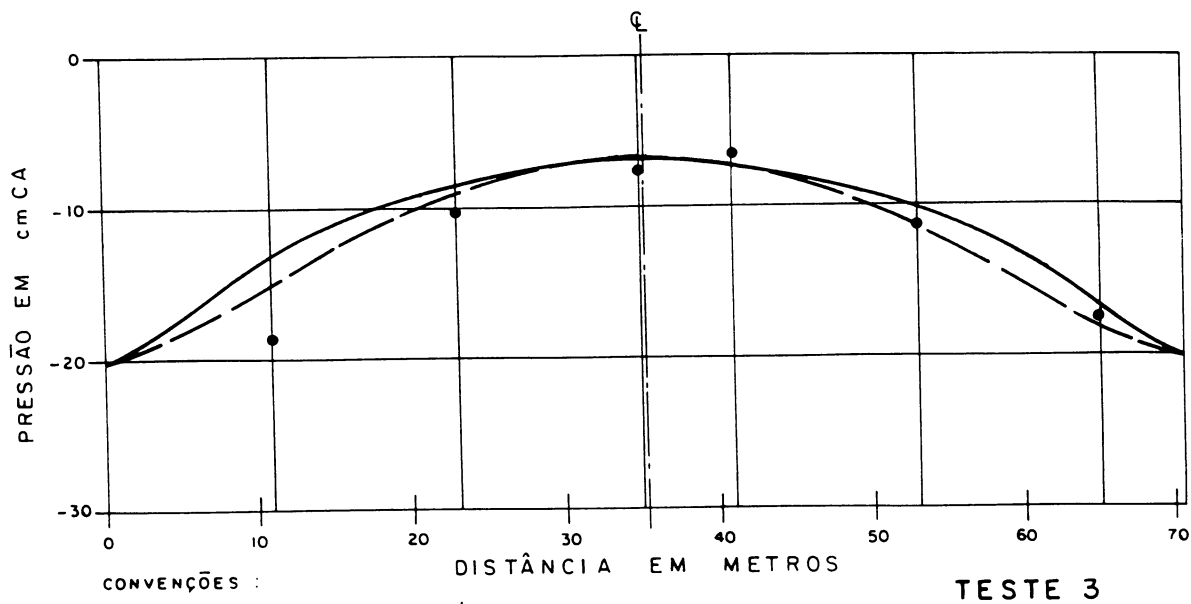
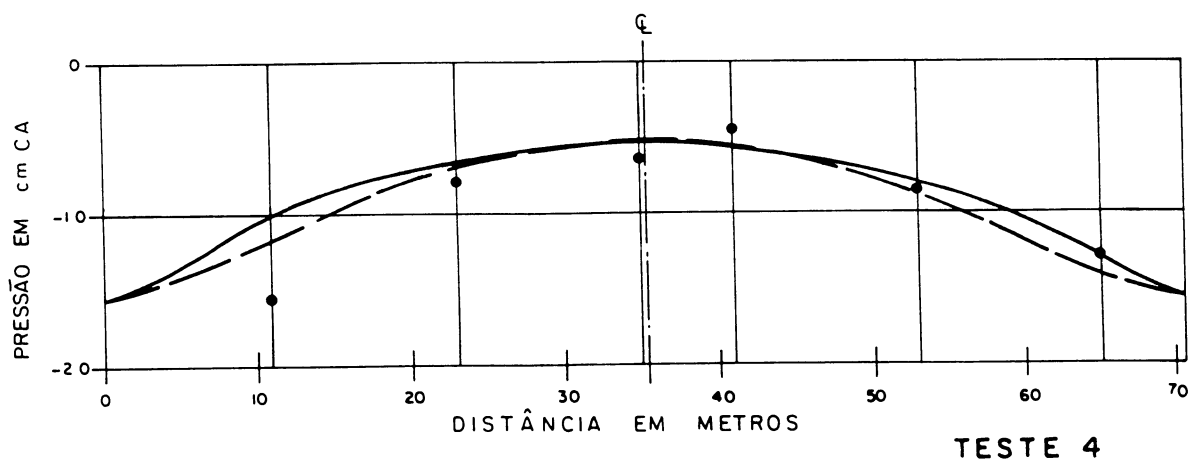
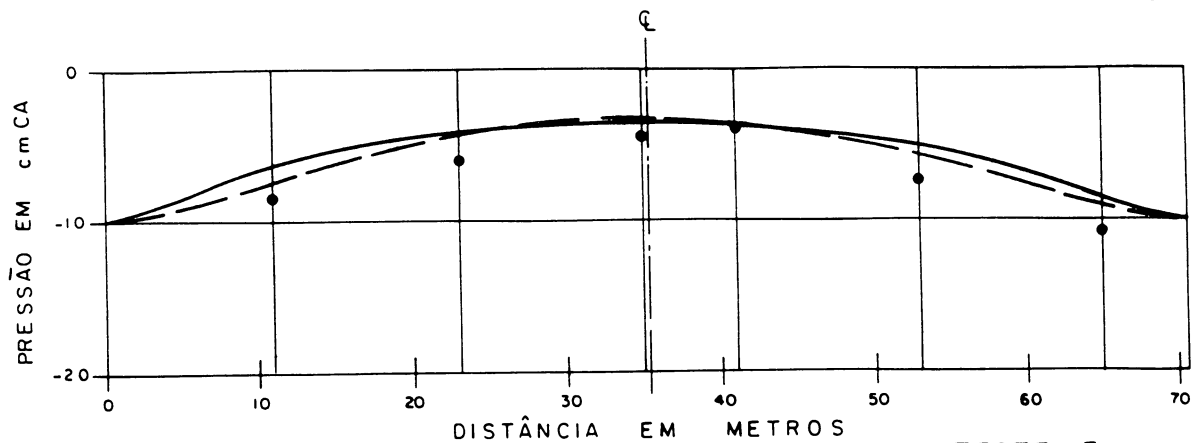
TABELA 18 - PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO E VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO - TESTES 8, 9 E 12

TESTE	$Q_{AR}$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	TOMADA	$h_{P1}$ (mCAR)	$h_{P2}$ (mCAR)	$h_{P3}$ (mCAR)	$h_{P4}$ (mCAR)	$\alpha V_D^2/2g$ (mCAR)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{MOD}$ (mCAR)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{MOD}$ (cmCA)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{PROT}$ (cmCA)
8	157,00	0,0		-0,727	-1,781	0,000	0,000	-71,869	-74,377	-9,0	
		5,6	8	-0,727	-1,781	-9,367	-12,888	-51,641	-76,404	-9,2	-14,0
		17,6	7	-0,727	-1,781	-9,367	-35,413	-27,832	-75,120	-9,1	-15,0
		29,6	6	-0,727	-1,781	-9,367	-51,176	-19,327	-82,378	-9,9	-13,0
		35,6	5	-0,727	-1,781	-9,367	-56,695	-15,163	-83,733	-10,1	-16,0
		47,6	4	-0,727	-1,781	-9,367	-63,622	-7,483	-82,980	-10,0	-12,0
		59,6	3	-0,727	-1,781	-9,367	-66,278	-1,917	-80,070	-9,6	-18,0
		70,6		-0,727	-1,781	-9,367	-66,629	0,000	-78,504	-9,5	
9	271,90	0,0		-2,181	-5,342	0,000	0,000	-215,555	-223,078	-26,9	
		5,6	8	-2,181	-5,342	-28,093	-38,656	-154,887	-229,159	-27,6	-32,0
		17,6	7	-2,181	-5,342	-28,093	-106,214	-83,477	-225,307	-27,2	-35,0
		29,6	6	-2,181	-5,342	-28,093	-153,491	-57,968	-247,075	-29,8	-31,0
		35,6	5	-2,181	-5,342	-28,093	-170,044	-45,479	-251,139	-30,3	-32,0
		47,6	4	-2,181	-5,342	-28,093	-190,821	-22,444	-248,881	-30,0	-29,0
		59,6	3	-2,181	-5,342	-28,093	-198,787	-5,748	-240,151	-28,9	-33,0
		70,6		-2,181	-5,342	-28,093	-199,839	0,000	-235,455	-28,4	
12	300,60	0,0		-2,665	-6,529	0,000	0,000	-263,462	-272,656	-32,9	
		5,6	8	-2,665	-6,529	-34,337	-47,248	-189,310	-280,089	-33,8	-35,0
		17,6	7	-2,665	-6,529	-34,337	-129,820	-102,030	-275,381	-33,2	-35,0
		29,6	6	-2,665	-6,529	-34,337	-187,604	-70,851	-301,986	-36,4	-36,0
		35,6	5	-2,665	-6,529	-34,337	-207,836	-55,587	-306,954	-37,0	-30,0
		47,6	4	-2,665	-6,529	-34,337	-233,230	-27,433	-304,194	-36,7	-34,0
		59,6	3	-2,665	-6,529	-34,337	-242,968	-7,026	-293,525	-35,5	-34,0
		70,6		-2,665	-6,529	-34,337	-244,253	0,000	-287,784	-34,7	

TABELA 19 - PRESSÕES AO LONGO DO DUTO DE AERAÇÃO - APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO E VALORES MEDIDOS NO PROTÓTIPO - TESTES 10, 11 E 13

TESTE	$Q_{AR}$ (m <sup>3</sup> /s)	x (m)	TOMADA	$h_{p1}$ (mCAR)	$h_{p2}$ (mCAR)	$h_{p3}$ (mCAR)	$h_{p4}$ (mCAR)	$\alpha v_D^2/2g$ (mCAR)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{MOD}$ (mCAR)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{MOD}$ (cmCA)	$\frac{\Delta p}{\gamma}_{PROT}$ (cmCA)
10	384,50	0,0		-4,361	-10,683	0,000	0,000	-431,056	-446,100	-53,8	
		5,6	8	-4,361	-10,683	-56,179	-77,303	-309,733	-458,259	-55,2	-60,0
		17,6	7	-4,361	-10,683	-56,179	-212,400	-166,933	-450,556	-54,3	-61,0
		29,6	6	-4,361	-10,683	-56,179	-306,943	-115,921	-494,087	-59,5	-54,0
		35,6	5	-4,361	-10,683	-56,179	-340,045	-90,947	-502,215	-60,5	-52,0
		47,6	4	-4,361	-10,683	-56,179	-381,593	-44,883	-497,699	-60,0	-49,0
		59,6	3	-4,361	-10,683	-56,179	-397,524	-11,495	-480,242	-57,9	-49,0
		70,6		-4,361	-10,683	-56,179	-399,627	0,000	-470,850	-56,7	
11	415,30	0,0		-5,087	-12,463	0,000	0,000	-502,880	-520,430	-62,7	
		5,6	8	-5,087	-12,463	-65,540	-90,183	-361,343	-534,616	-64,4	-68,0
		17,6	7	-5,087	-12,463	-65,540	-247,791	-194,748	-525,629	-63,3	-64,0
		29,6	6	-5,087	-12,463	-65,540	-358,087	-135,236	-576,413	-69,5	-59,0
		35,6	5	-5,087	-12,463	-65,540	-396,705	-106,101	-585,896	-70,6	-57,0
		47,6	4	-5,087	-12,463	-65,540	-445,175	-52,361	-580,626	-70,0	-53,0
		59,6	3	-5,087	-12,463	-65,540	-463,761	-13,411	-560,262	-67,5	-52,0
		70,6		-5,087	-12,463	-65,540	-466,215	0,000	-549,305	-66,2	
13	405,30	0,0		-4,845	-11,870	0,000	0,000	-478,954	-495,669	-59,7	
		5,6	8	-4,845	-11,870	-62,422	-85,892	-344,151	-509,180	-61,4	-65,0
		17,6	7	-4,845	-11,870	-62,422	-236,002	-185,482	-500,621	-60,3	-
		29,6	6	-4,845	-11,870	-62,422	-341,050	-128,802	-548,989	-66,2	-64,0
		35,6	5	-4,845	-11,870	-62,422	-377,830	-101,053	-558,020	-67,2	-54,0
		47,6	4	-4,845	-11,870	-62,422	-423,995	-49,870	-553,002	-66,6	-55,0
		59,6	3	-4,845	-11,870	-62,422	-441,696	-12,773	-533,606	-64,3	-
		70,6		-4,845	-11,870	-62,422	-444,033	0,000	-523,170	-63,0	

pontos. As distribuições de pressão calculadas utilizando os parâmetros desta dissertação são ilustradas por linhas contínuas. As distribuições obtidas numericamente por Clóvis M. ÁVILA (1990) são representadas por linhas descontínuas.



CONVENÇÕES :

- Valores experimentais - protótipo
- Modelo proposto neste trabalho
- - - Modelo Clóvis Ávila

Figura 26 — Pressões ao longo do duto de aeração — Valores medidos no protótipo e aplicação do modelo proposto — TESTES 5, 4 e 3.

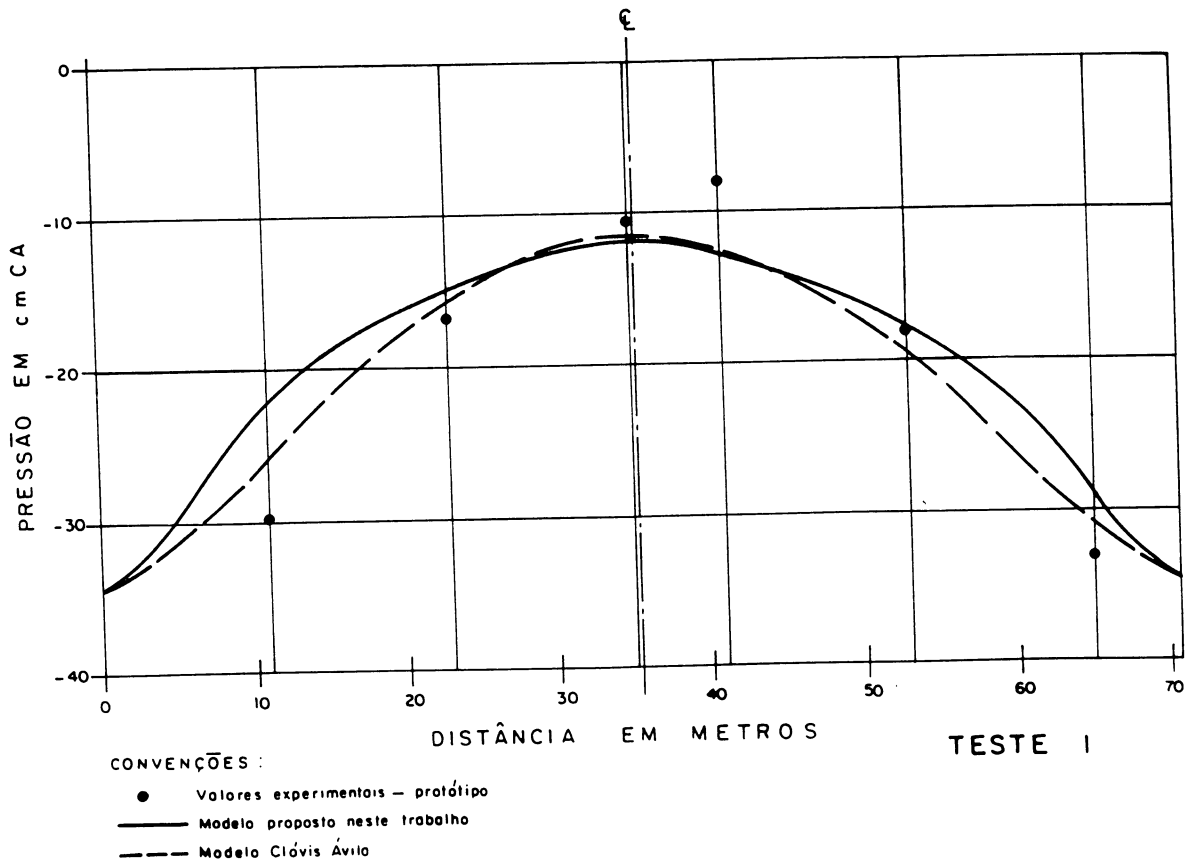
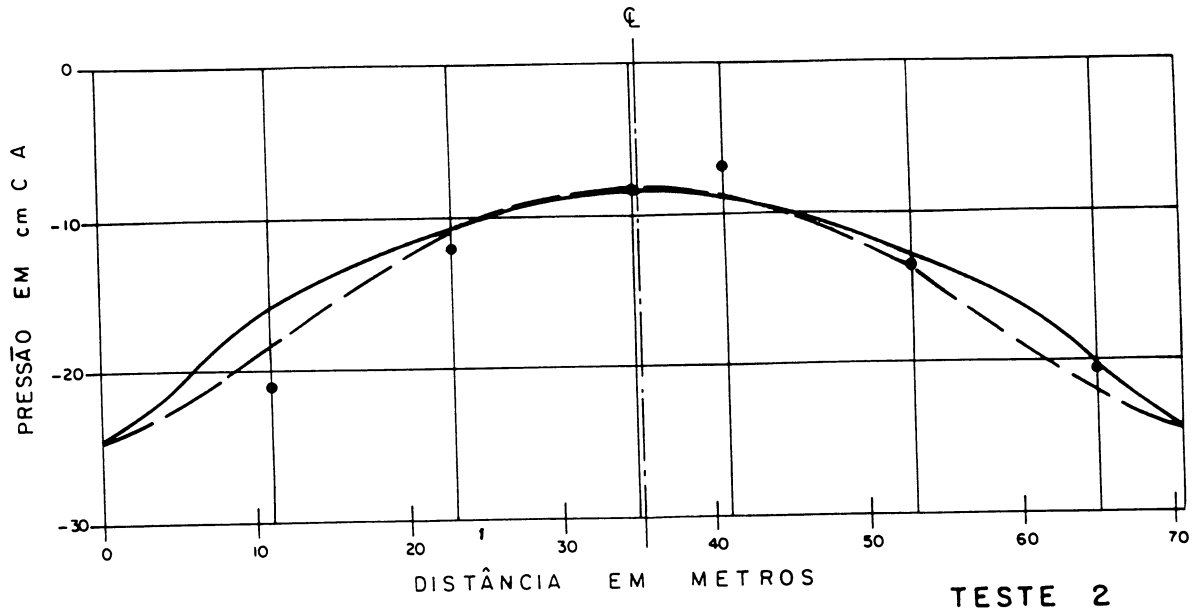
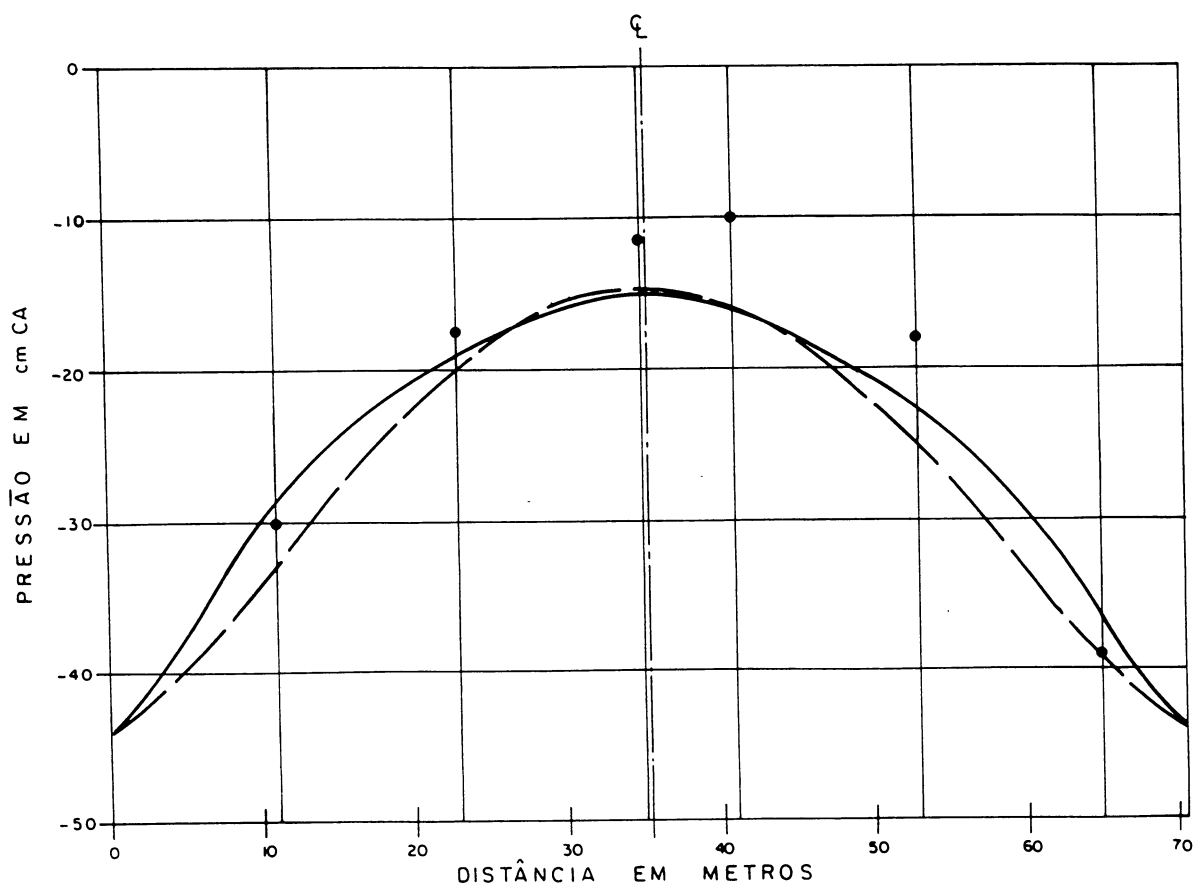
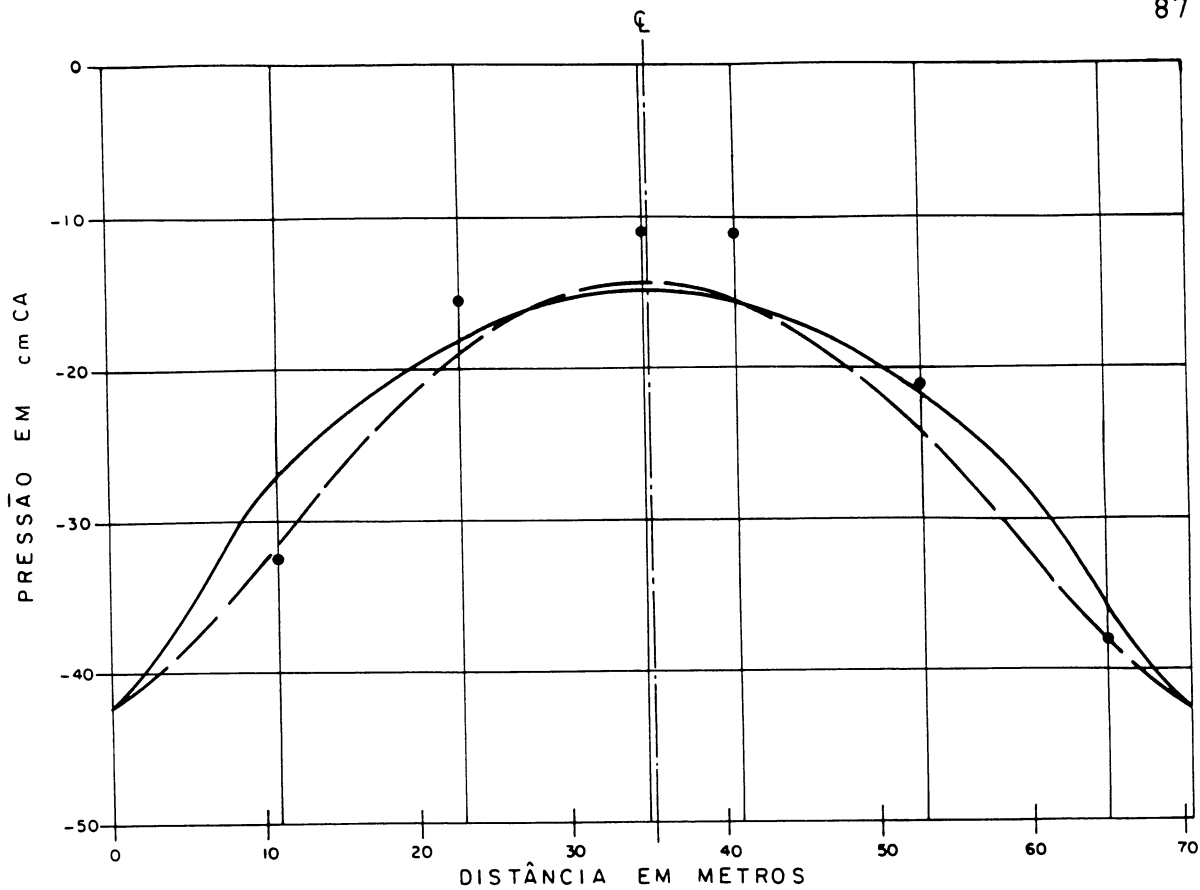


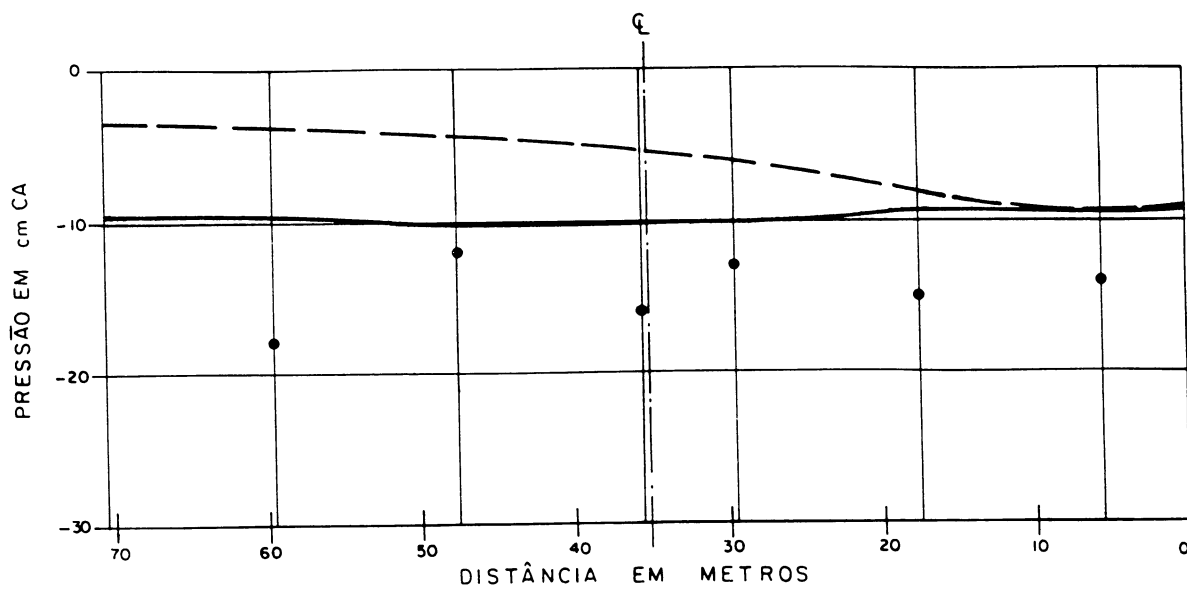
Figura 27 — Pressões ao longo do duto de aerção - Valores medidos no protótipo e aplicação do modelo proposto - TESTES 2 e 1.



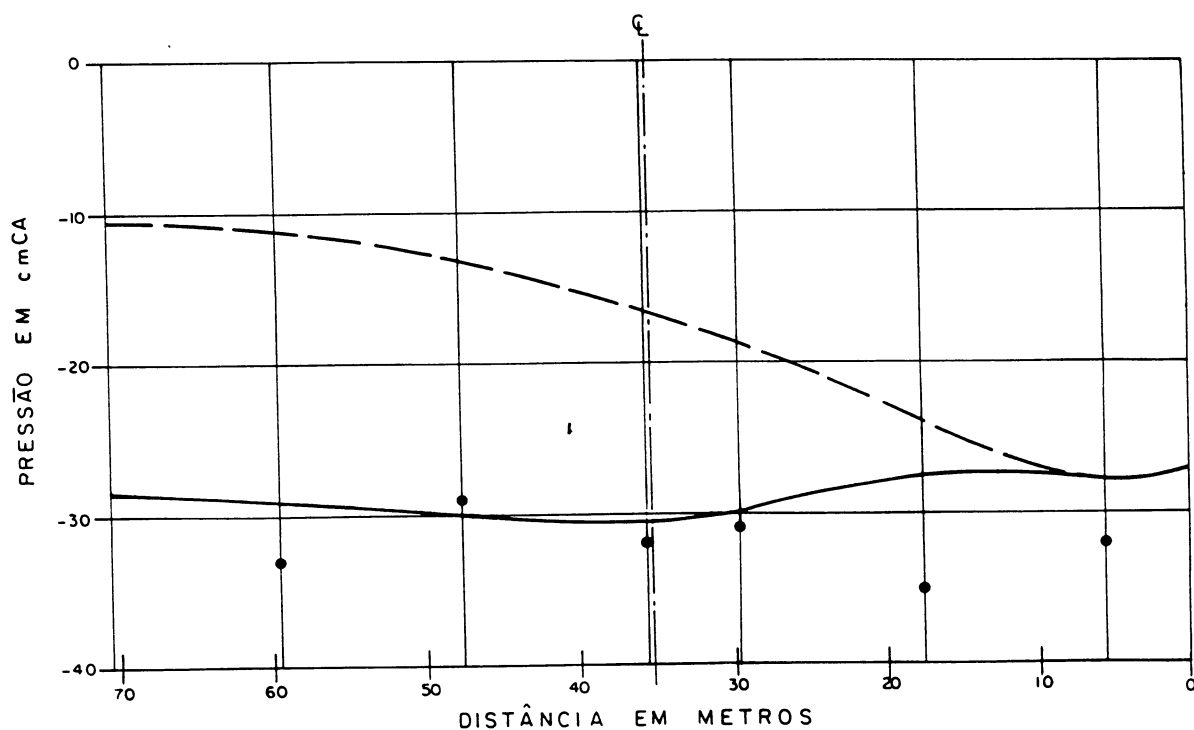
## CONVENÇÕES

- Valores experimentais - protótipo
- Modelo proposto neste trabalho
- - - Modelo Clóvis Ávila

Figura 28 — Pressões ao longo do duto de aeração — Valores medidos no protótipo e aplicação do modelo proposto — TESTES 6 e 7.



TESTE 8

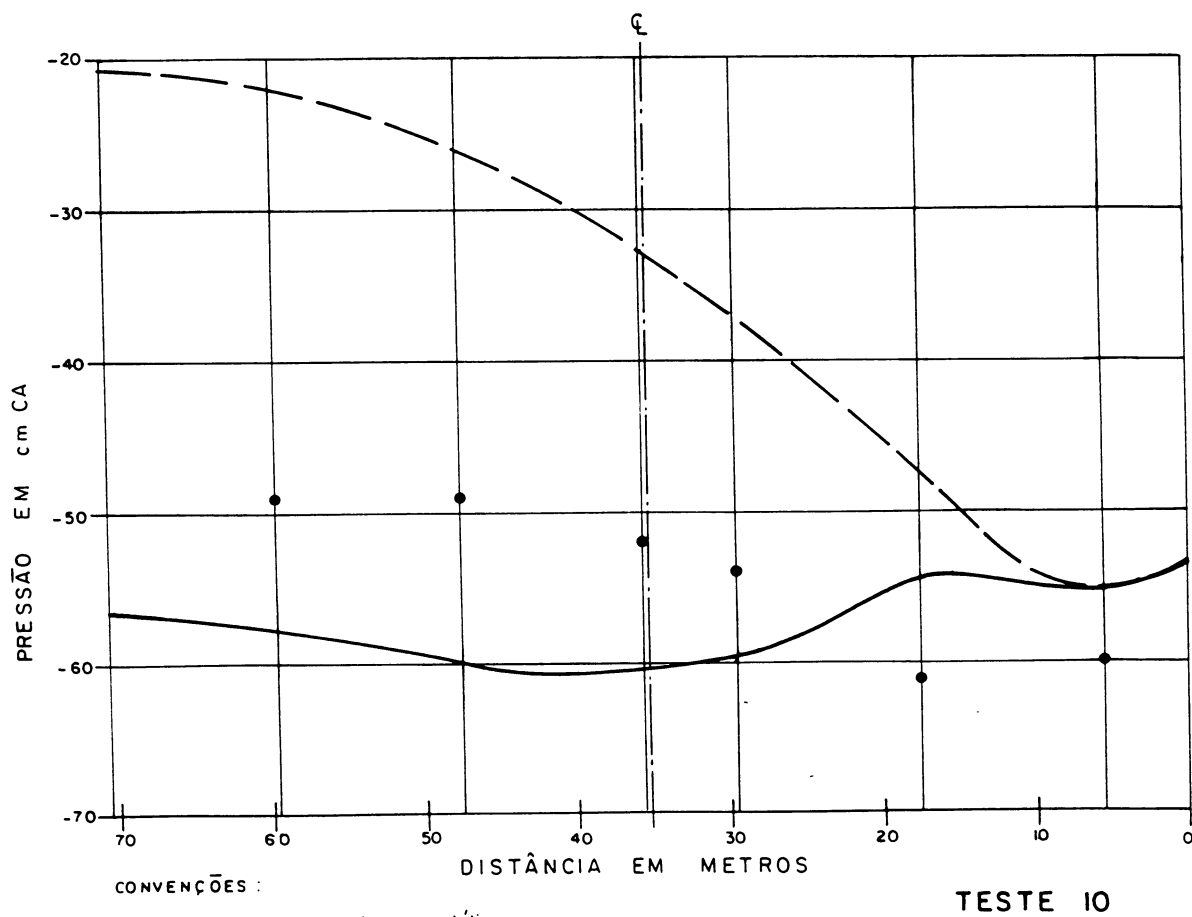
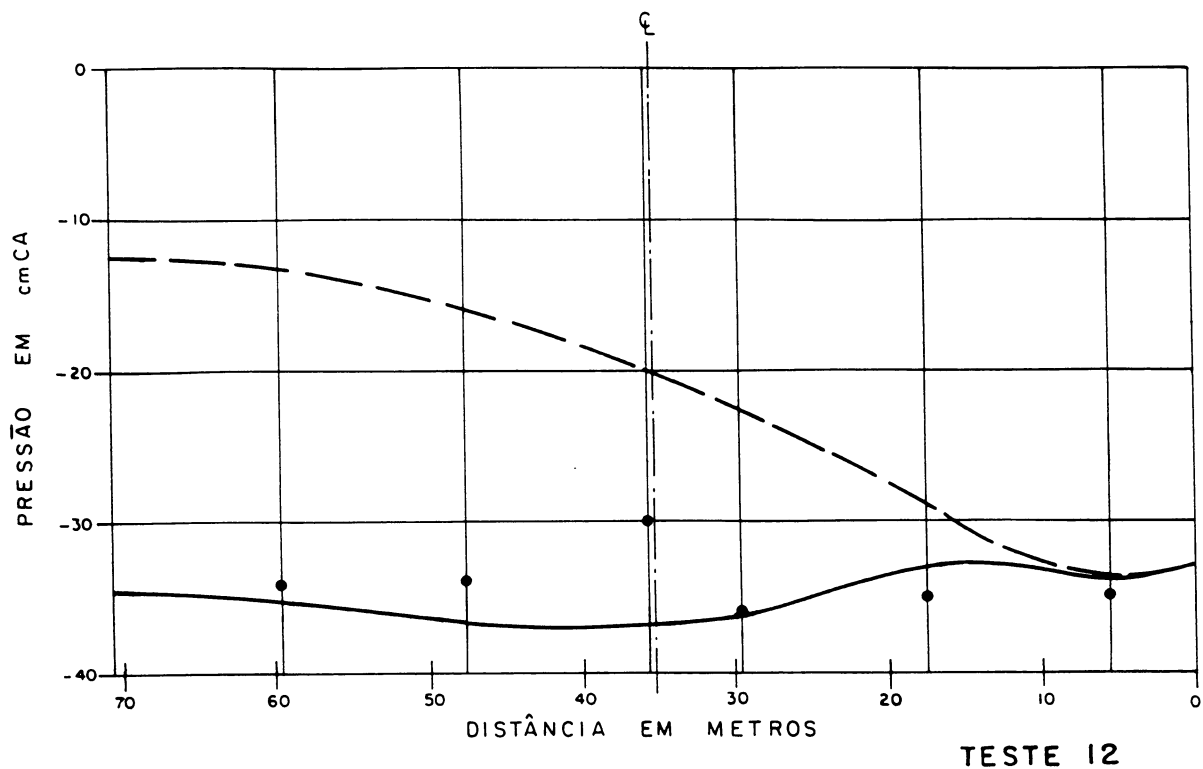


TESTES 9

CONVENÇÕES:

- Valores experimentais - protótipo
- Modelo proposto neste trabalho
- - - Modelo Clóvis Ávila

Figura 29 — Pressões ao longo do duto de aeração - Valores medidos no protótipo e aplicação do modelo proposto - TESTES 8 e 9.



CONVENÇÕES :

- Valores experimentais - protótipo
- Modelo proposto neste trabalho
- - - Modelo Clóvis Ávila

Figura 30 — Pressões ao longo do duto de aeração — Valores medidos no protótipo e aplicação do modelo proposto — TESTES 12 e 10.

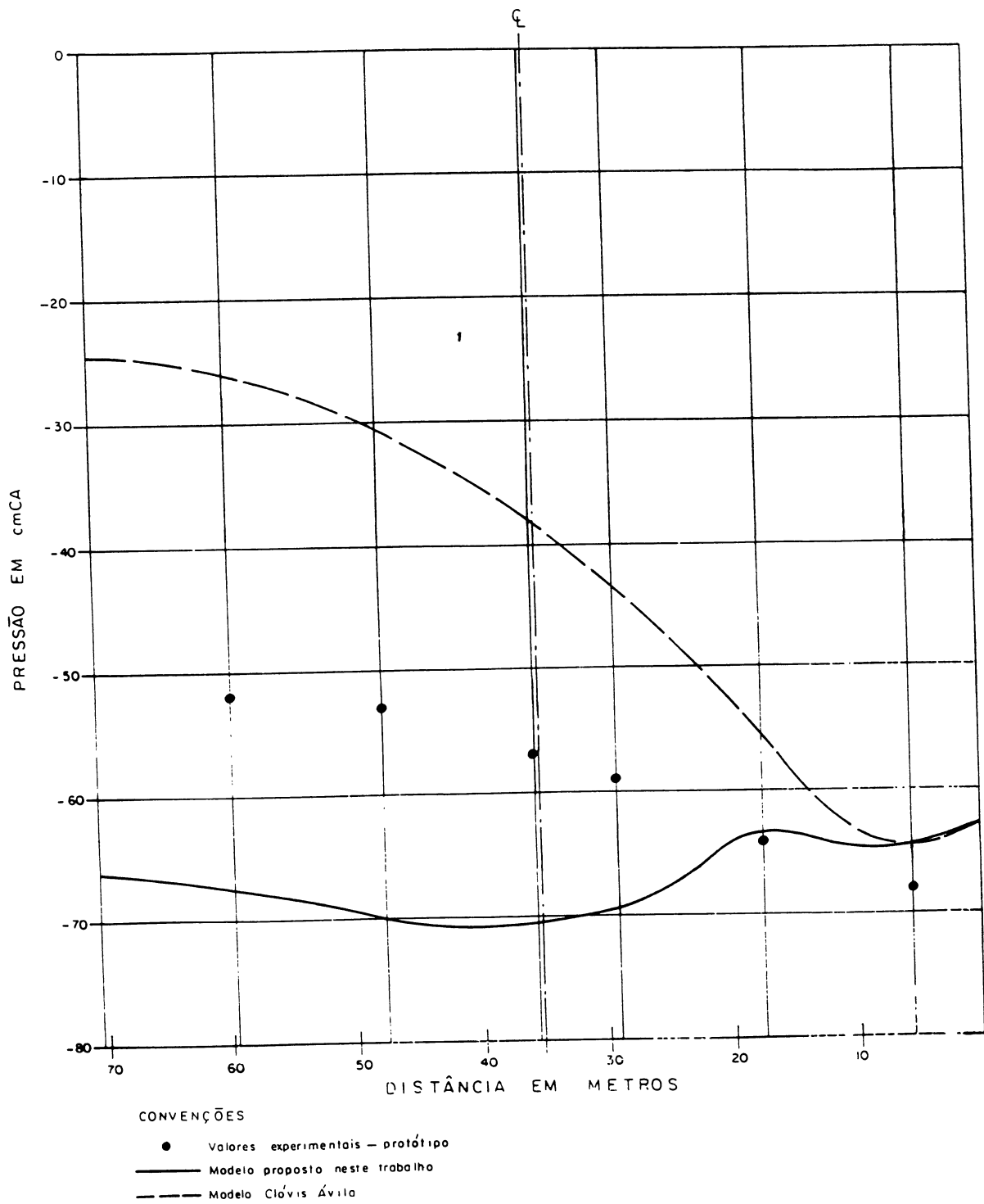


Figura 31 - Pressões ao longo do duto de aeração - Valores medidos no protótipo e aplicação do modelo proposto - TESTE II

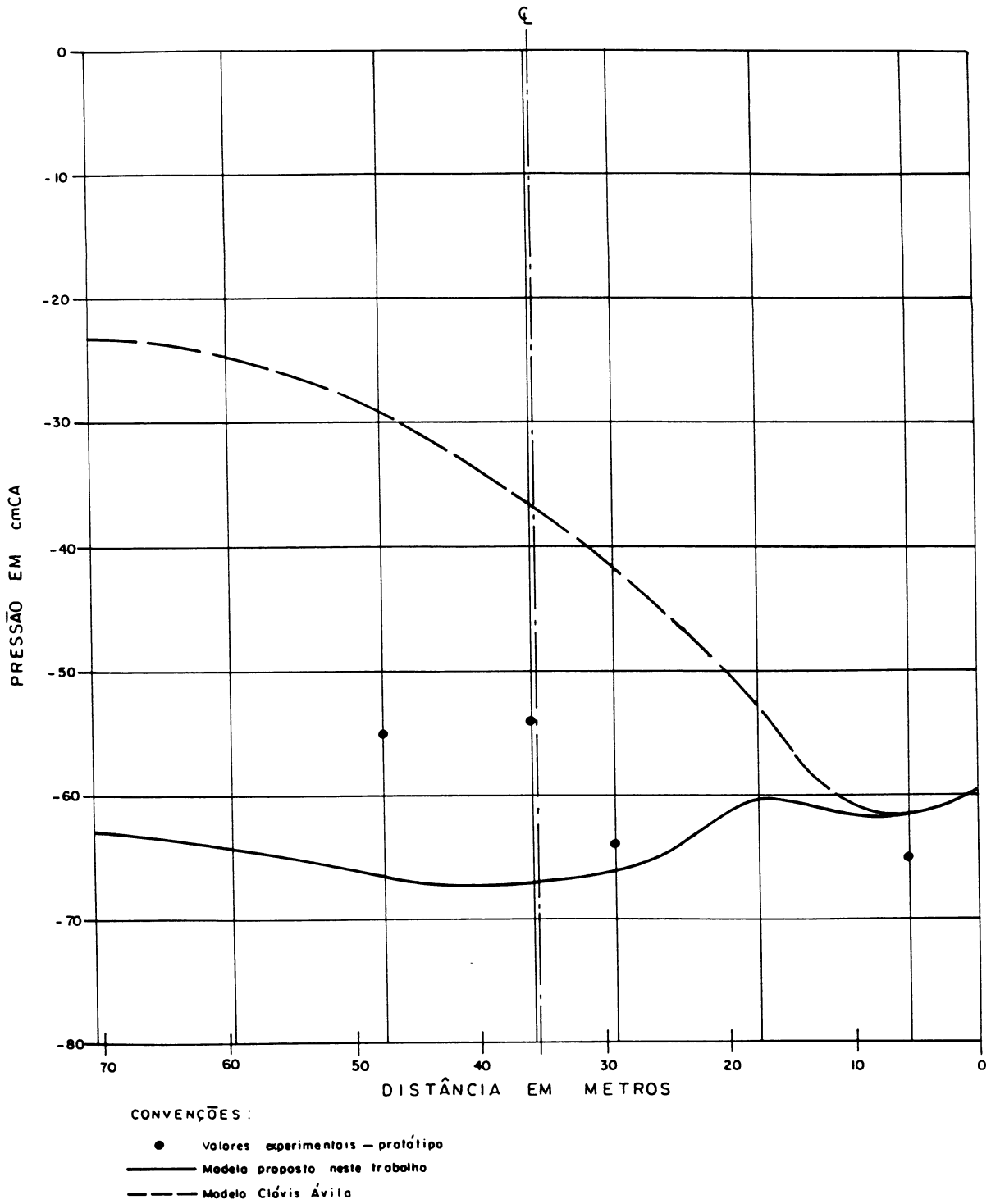


Figura 32 - Pressões ao longo do duto de aeração - Valores medidos no protótipo e aplicação do modelo proposto - TESTE 13

#### 4 CONCLUSÕES

O predimensionamento de aeradores pode ser feito utilizando-se equações empíricas, conforme citado no capítulo I. Porém, o cálculo do coeficiente  $C$  requer a modelagem numérica do escoamento do ar no aerador. Modelos propostos anteriormente não apresentam resultados totalmente satisfatórios. A investigação conduzida nesta dissertação permitiu o esclarecimento de alguns aspectos de modelagem matemática e seu aperfeiçoamento.

A questão da perda de carga na transição entre os dutos de admissão e aeração dos aeradores de Foz do Areia foi estudada em detalhe.

Fatores importantes na definição desta perda de energia são a geometria da transição e o grau de expansão do fluxo ao entrar no duto de aeração. Os testes em modelo reduzido mostraram que o coeficiente de perda de carga local ( $K_{L3}$ ) é bastante sensível ao grau e a geometria da expansão. O valor médio de  $K_{L3}$  passou de 0,597 a 0,371 com a alteração de seção mostrada na figura 10.

A distribuição em marcha verificada no duto de aeração também influencia esta perda de carga. Ábacos e tabelas disponíveis para o cálculo da perda de carga consideram em

geral o fluxo constante e contínuo ao longo do duto. Os experimentos demonstraram que a retirada de parte do fluxo perturbado junto ao contorno diminui o coeficiente de perda de carga local. O valor médio deste coeficiente caiu de 0,371 para 0,238 com a ocorrência de distribuição em marcha do ar, mantidas as demais condições.

À distribuição de vazões de ar observada ao longo do duto de aeração nos testes com distribuição em marcha do ar foi ajustada uma parábola de 2º grau. A consideração de que a seção de escoamento é constante e uniforme para todas as vazões permitiu obter a distribuição de velocidades. Entretanto o confronto entre as distribuições de pressão no duto de aeração observadas no protótipo e calculadas por meio do modelo numérico sugere que a seção de escoamento varia em função da vazão de água. À medida que a vazão de água cresce, a diferença entre as pressões calculadas e observadas aumenta. As calculadas têm valores negativos maiores do que as observadas. Aparentemente o duto de aeração no protótipo tem seção de escoamento crescente com a vazão de água. Deste modo, a altura de velocidade e a perda contínua no duto de aeração são menores e as pressões maiores do que as indicadas pelo modelo matemático. Fisicamente, este aumento de seção é compreensível, tendo em vista a maior velocidade do fluxo e portanto maior alcance do jato à medida em que aumenta a vazão, conforme apresentado por PINTO e NEIDERT (1981).

A partir dos resultados de testes nos aeradores do vertedouro de Foz do Areia, mencionados anteriormente, foi avaliada a "rugosidade" da interface ar-água do aerador. Os valores do coeficiente médio de Strickler  $K_s$  encontrados, iguais a 48 e 31 para testes com operação simétrica e assimétrica do aerador, indicam grande resistência ao escoamento do ar. Admitindo-se  $K_s = 80$  para o concreto, a resistência da interface ar-água é estimada por coeficiente de Strickler de 34 e 20. A ocorrência de diferentes rugosidades equivalentes nas duas condições é um ponto que merece investigações adicionais.

ANEXO 1 - LINHAS PIEZOMÉTRICAS NO DUTO DE AERAÇÃO

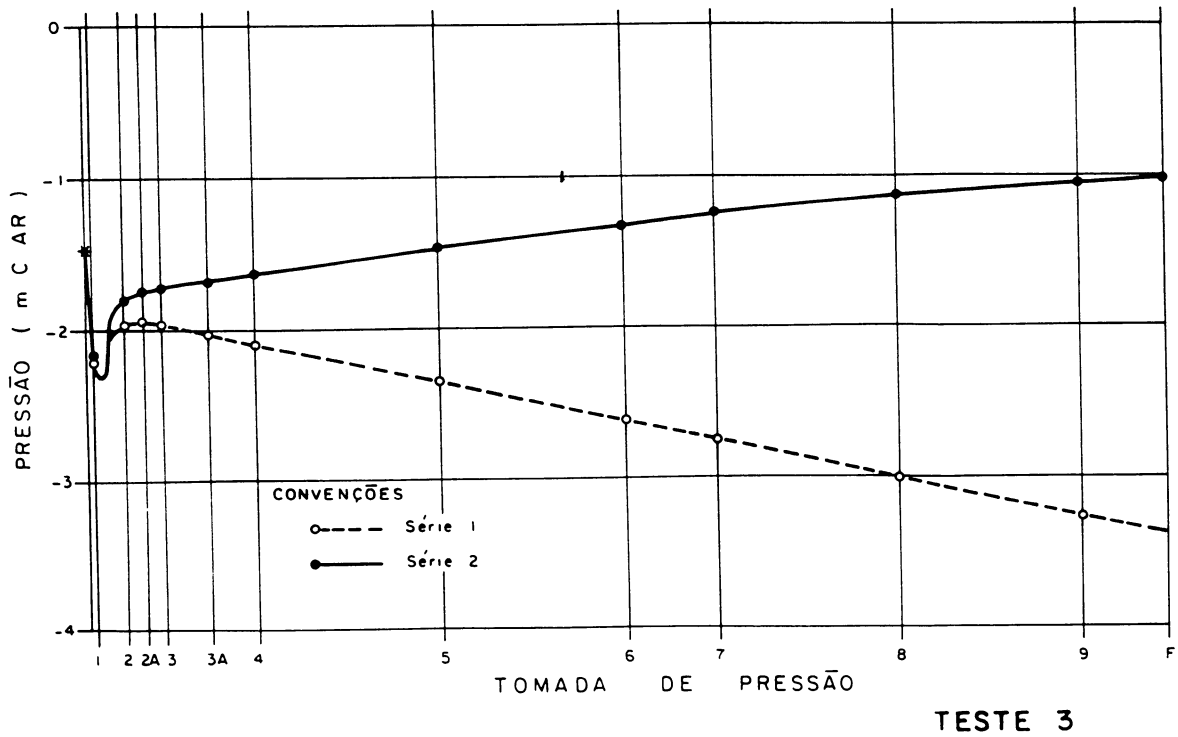
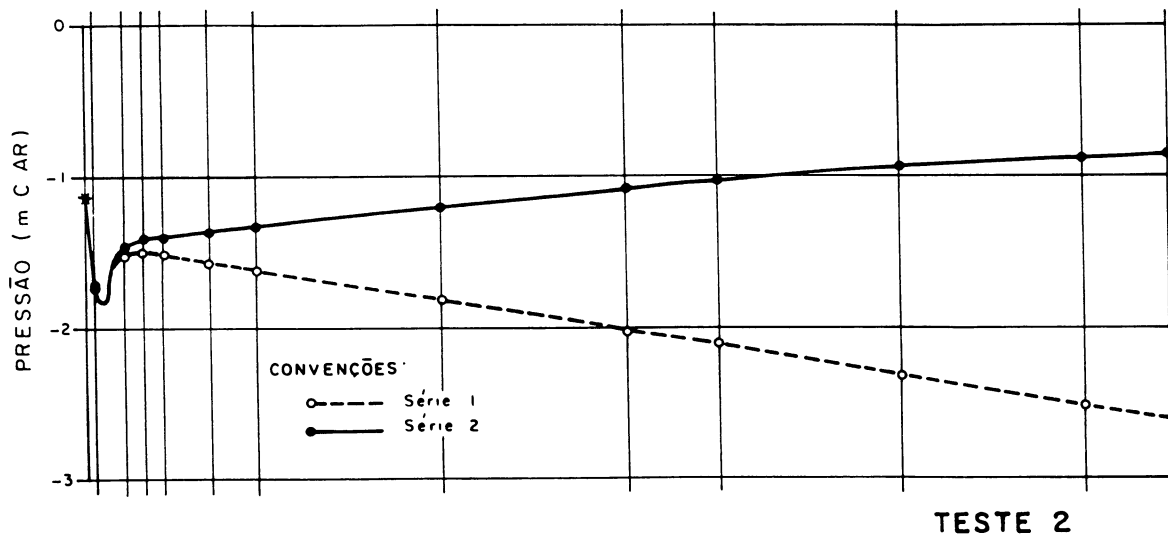
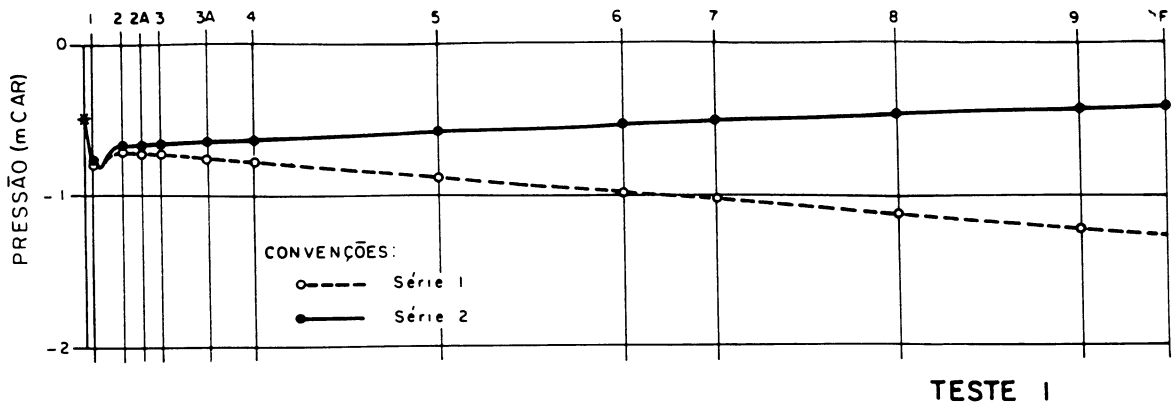
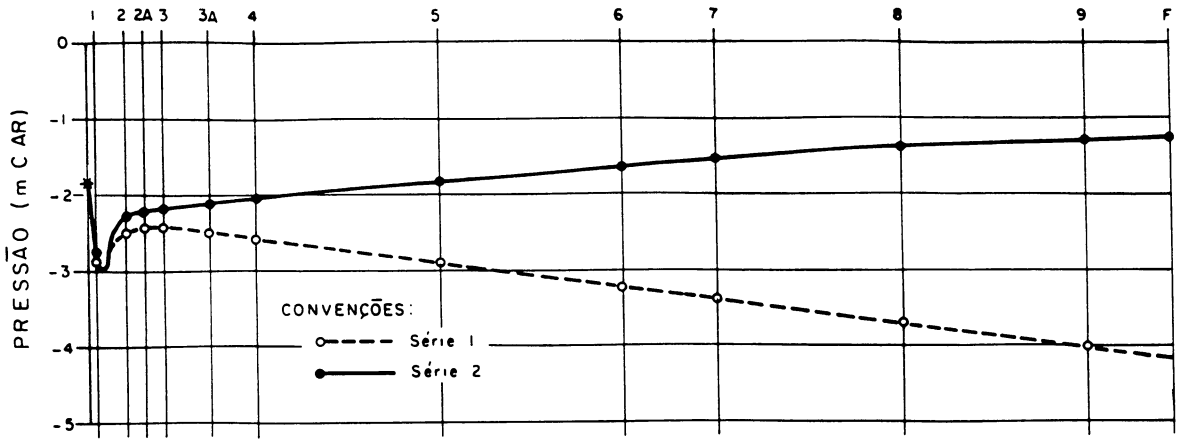
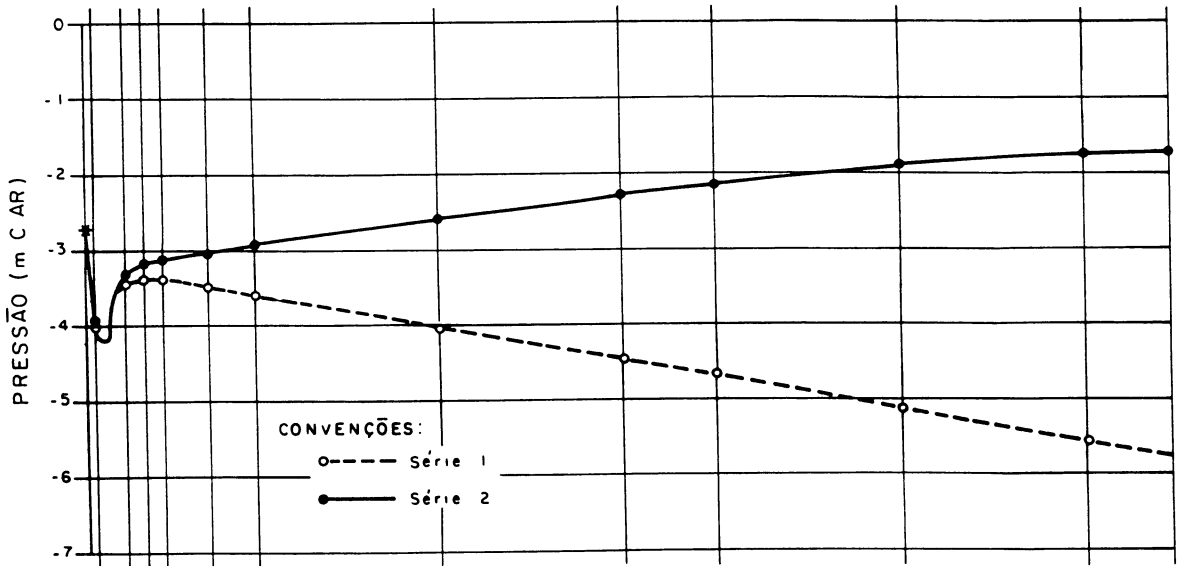


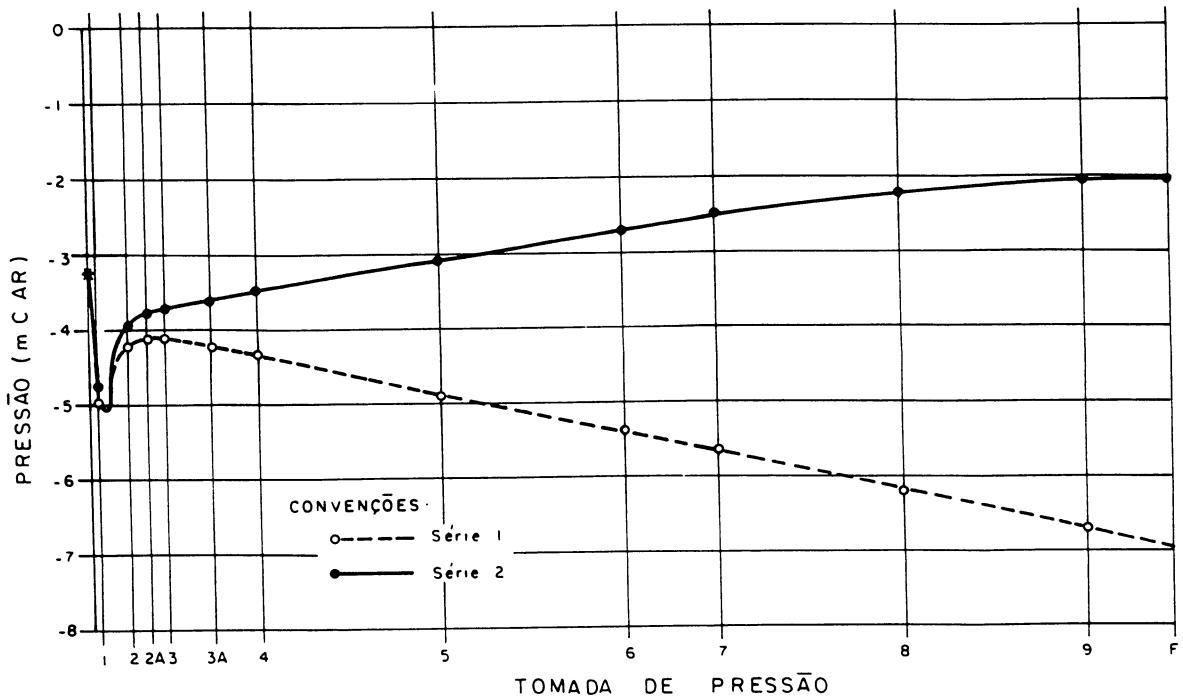
Figura 33 — Linha piezométrica no duto de aeração - TESTES 1, 2 e 3.



TESTE 4



TESTE 5



TOMADA DE PRESSÃO

TESTE 6

Figura 34 - Linha piezométrica no duto de aeração - TESTES 4, 5 e 6.

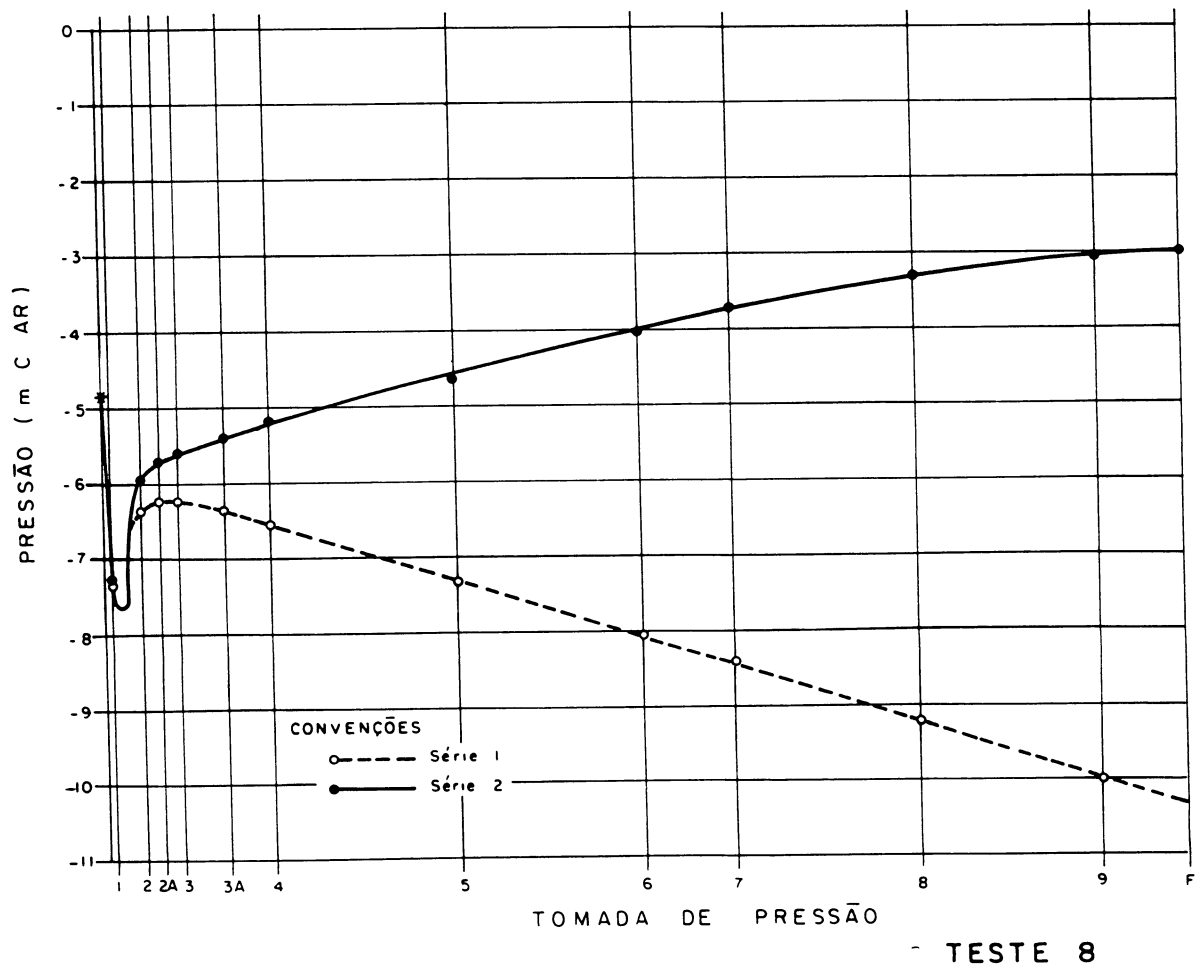
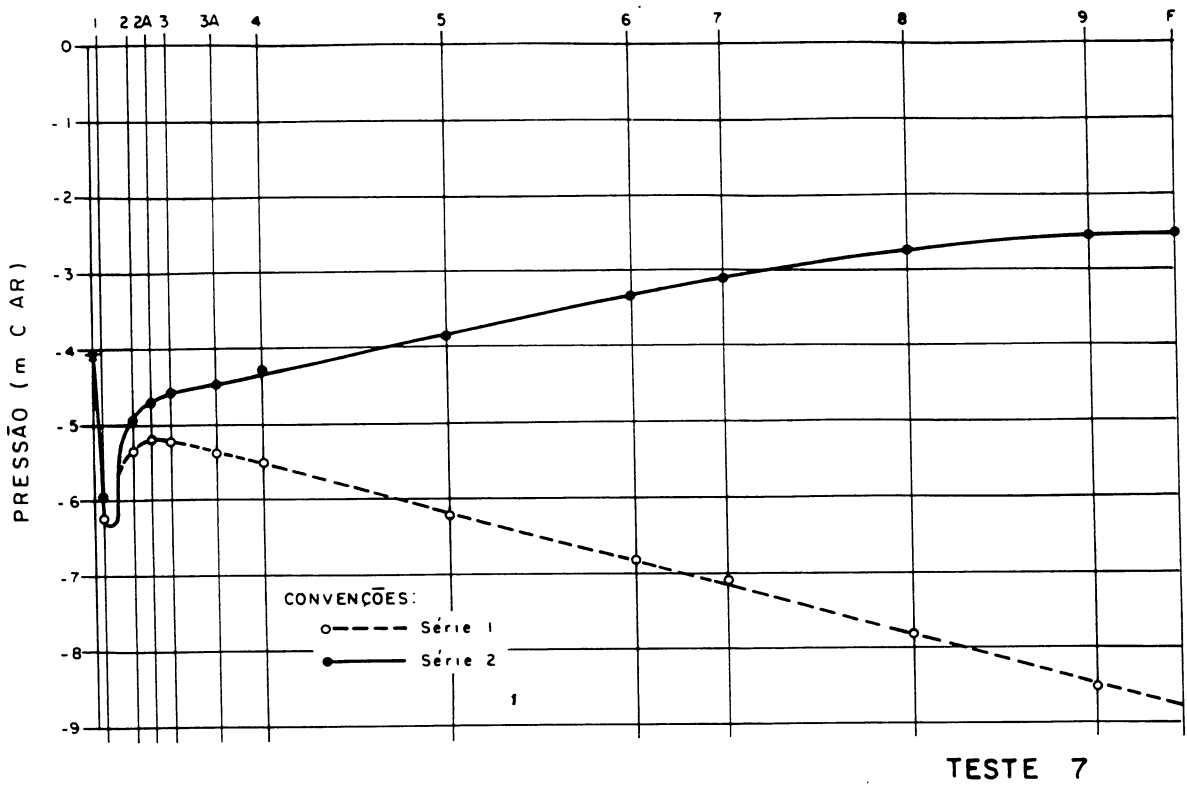


Figura 35 - Linha piezométrica no duto de aeração - TESTES 7 e 8.

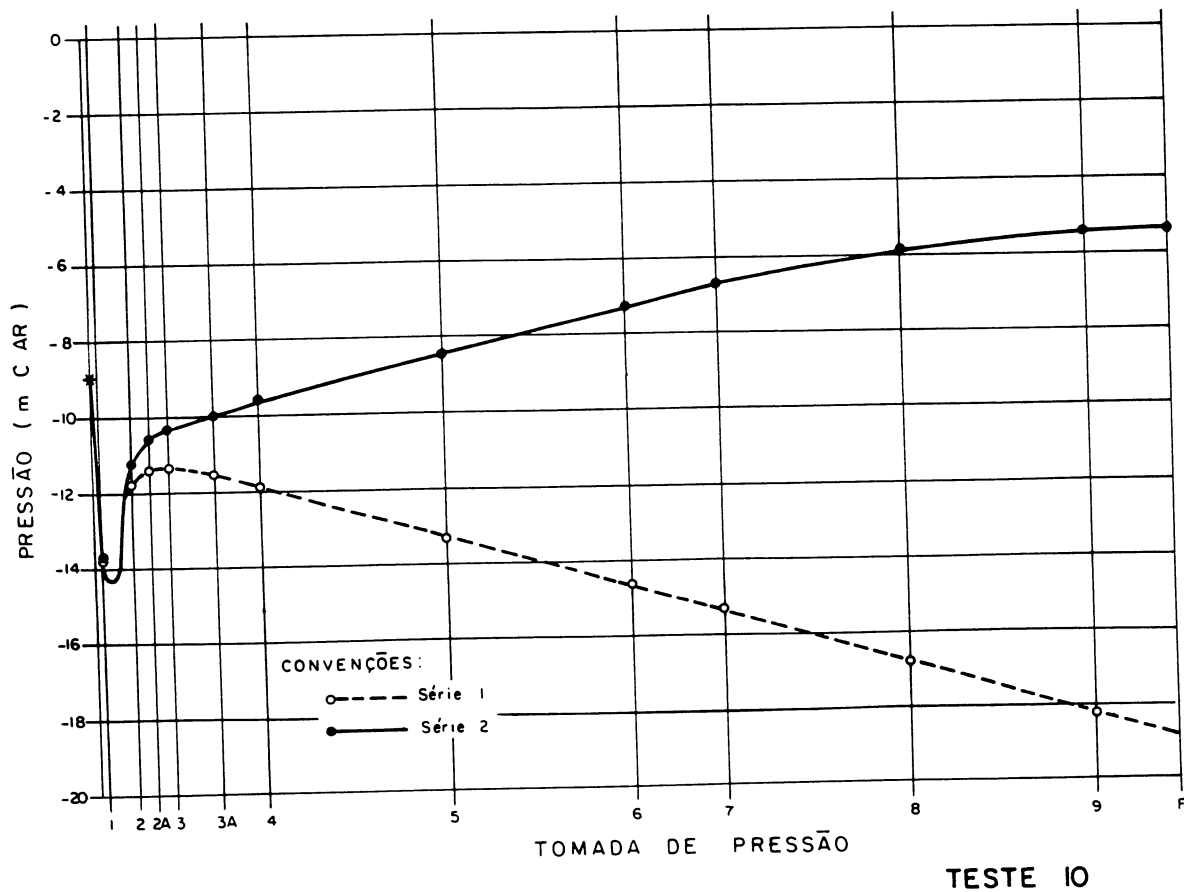
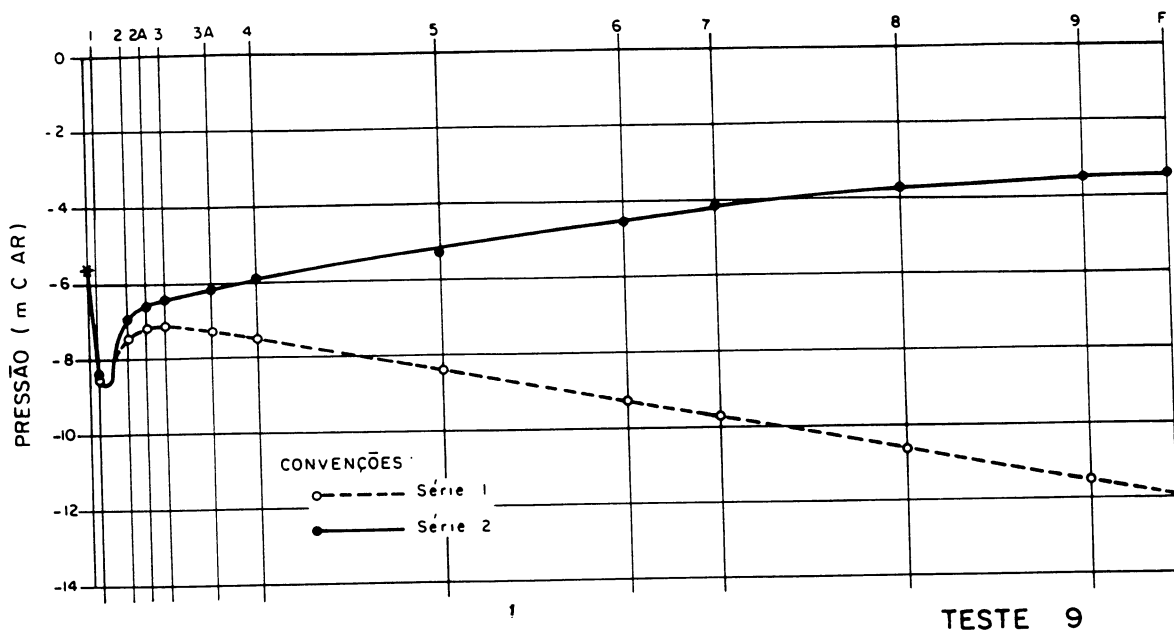


Figura 36 - Linha piezométrica no duto de aeração - TESTES 9 e 10.

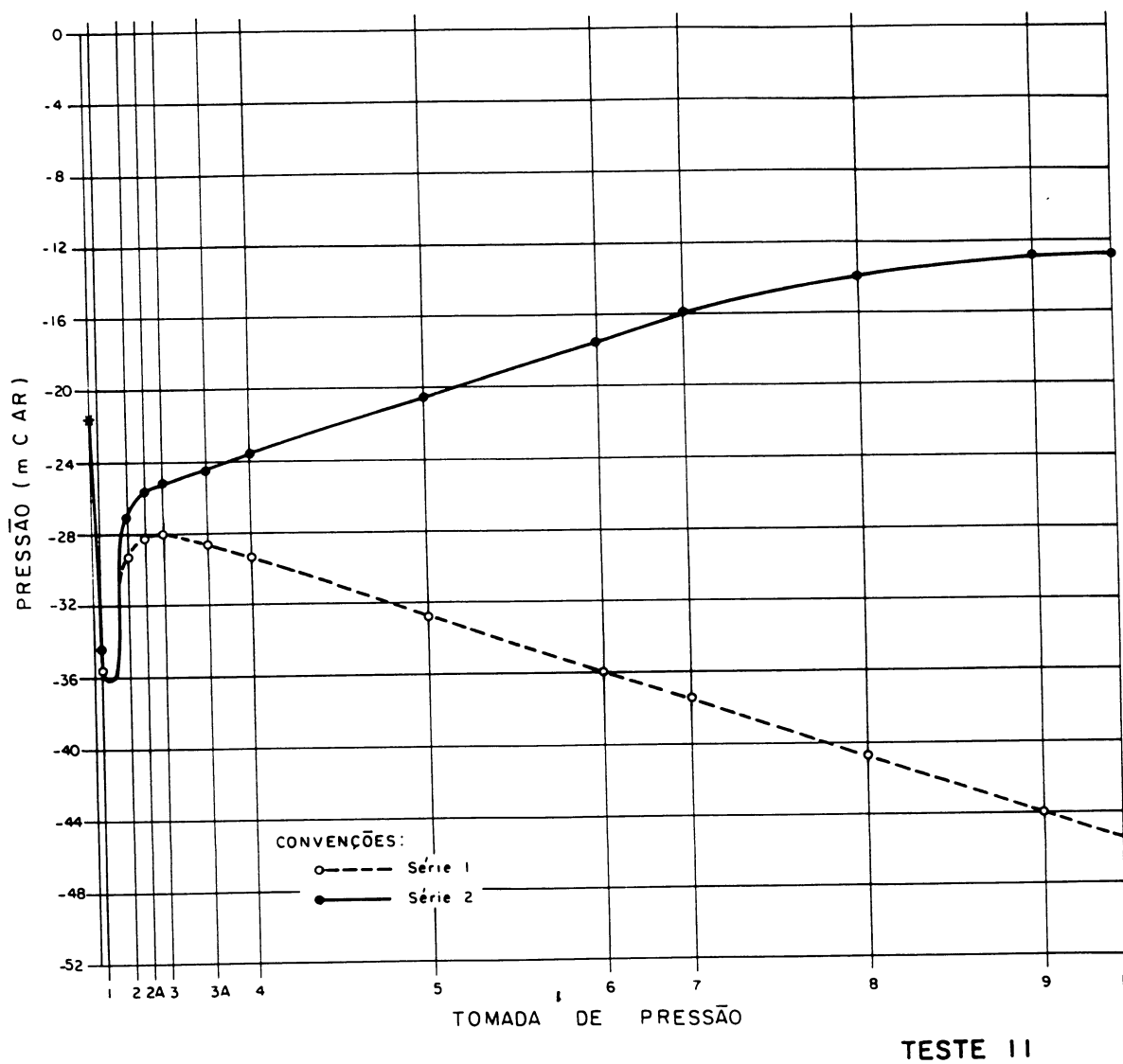
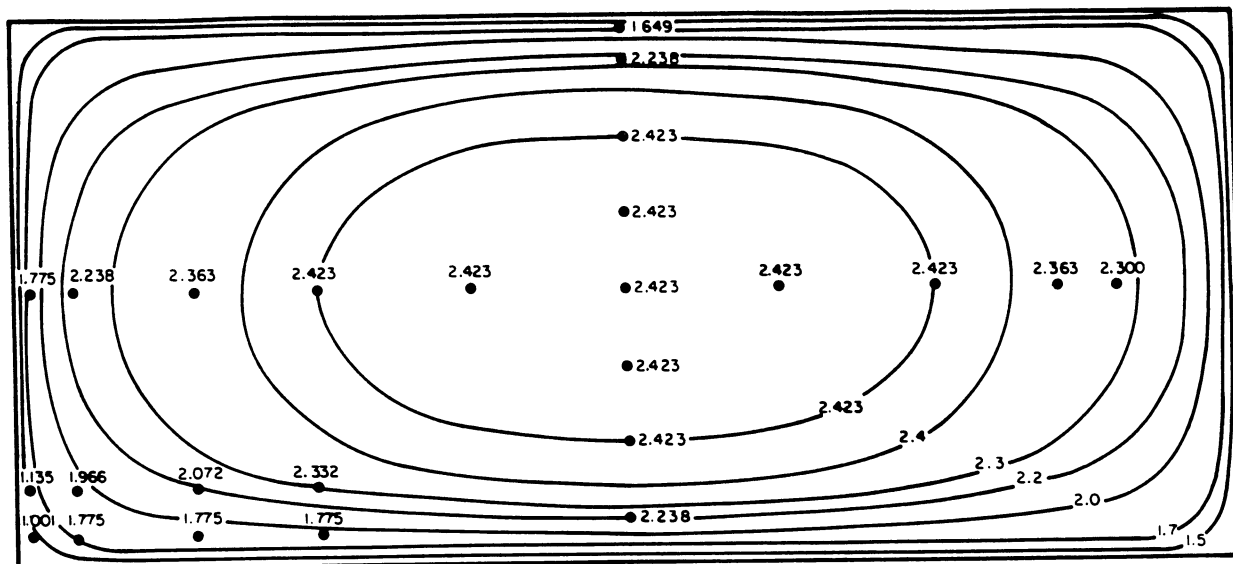
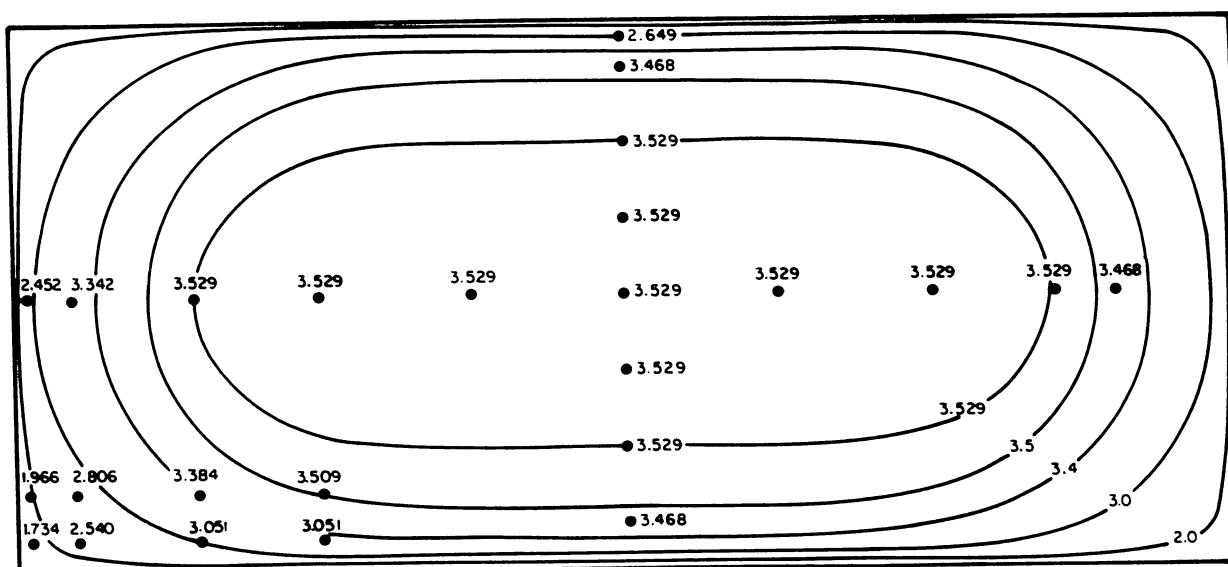


Figura 37 — Linha piezométrica no duto de aeração — TESTE II

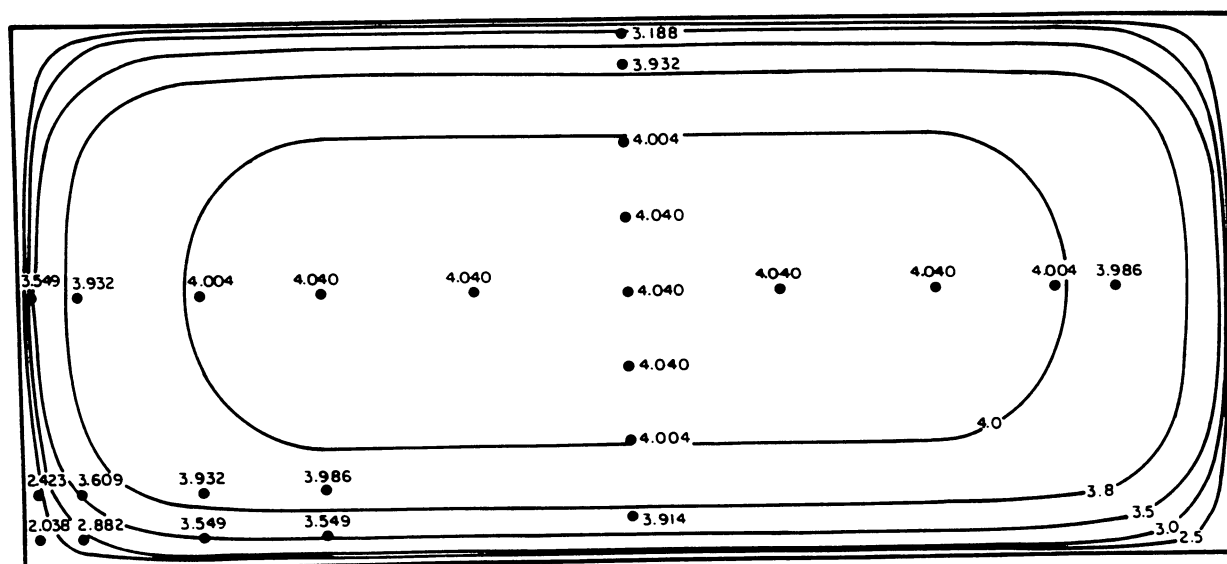
ANEXO 2 - ISÓTACAS NA SEÇÃO DA TOMADA 49 NA TORRE DE  
ALIMENTAÇÃO DO AERADOR



TESTE 1



TESTE 2



TESTE 3

Figura 38 - Isótacas na seção da tomada 49. TESTES 1, 2 e 3.







ANEXO 3 - ISÓTACAS NO DUTO DE AERAÇÃO

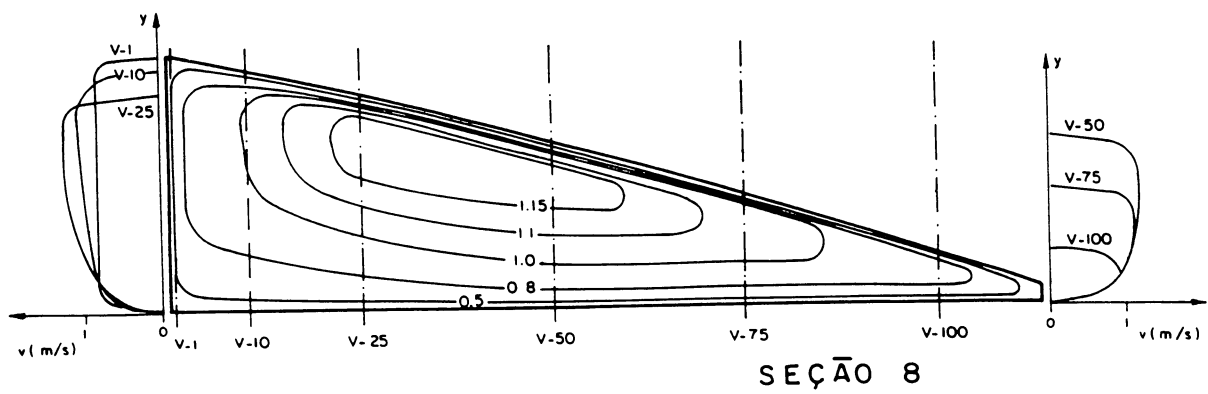
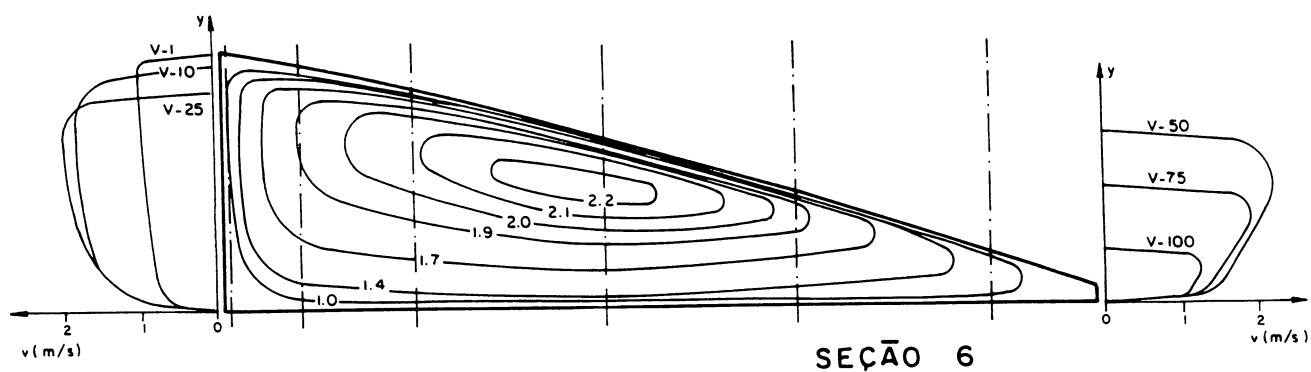
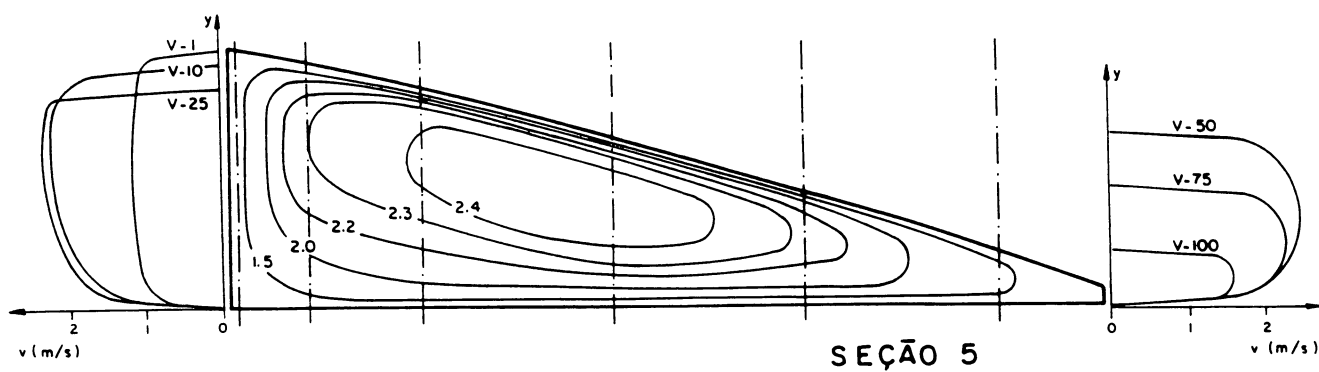
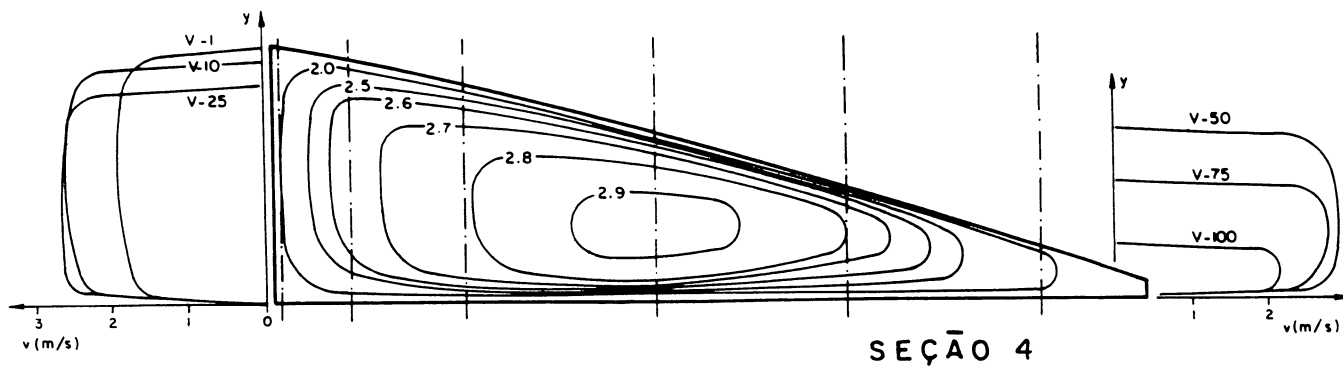
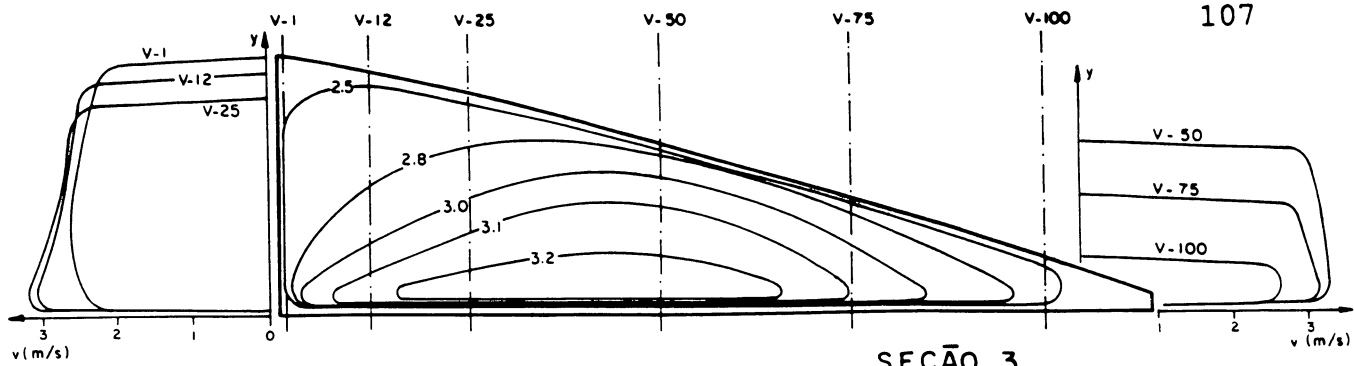


Figura 42 - Isótopas no duto de aeração - TESTE OI.

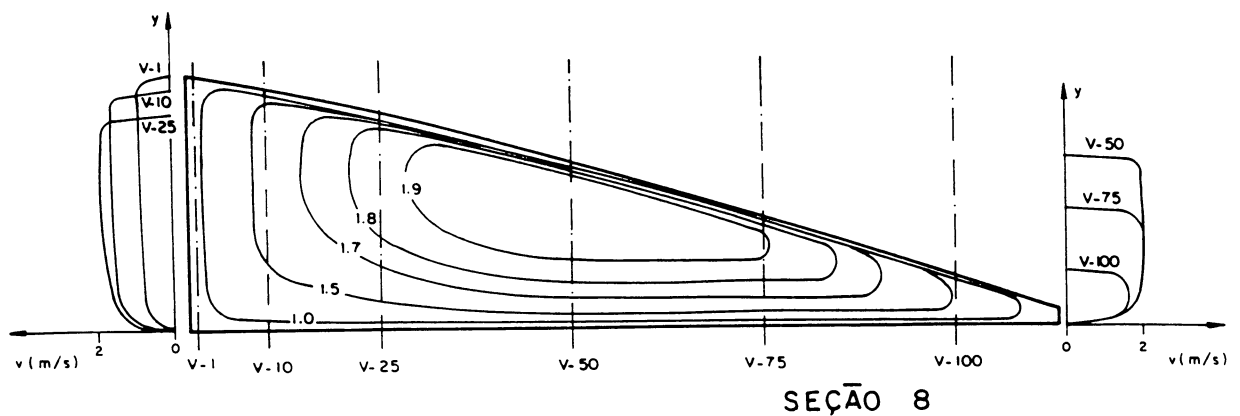
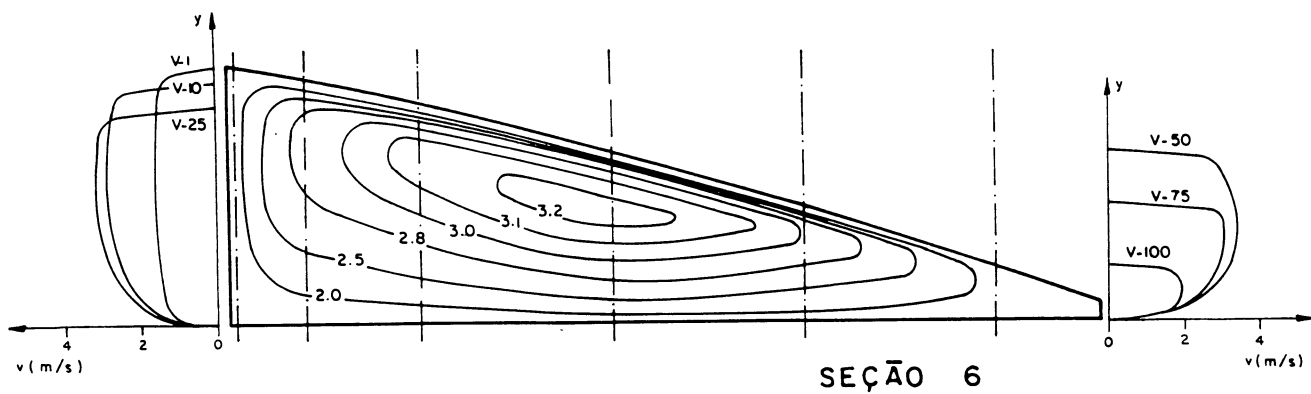
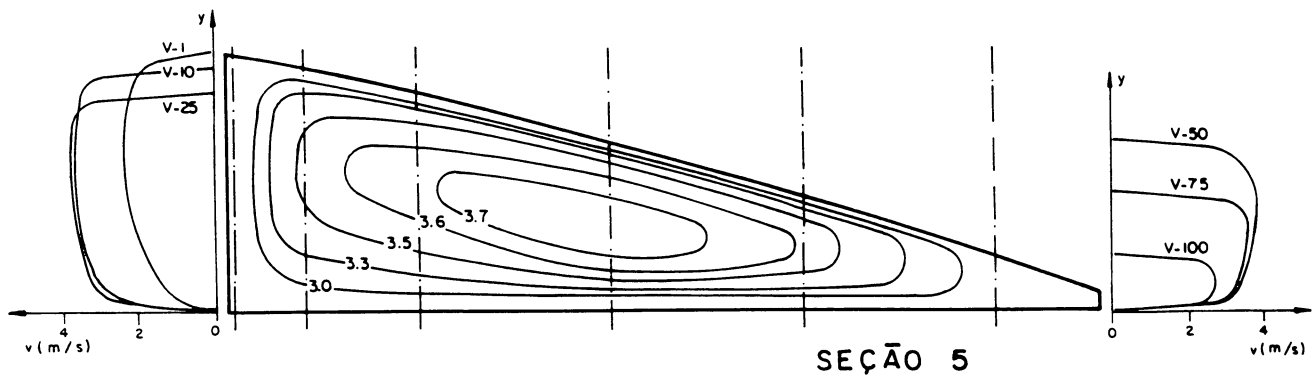
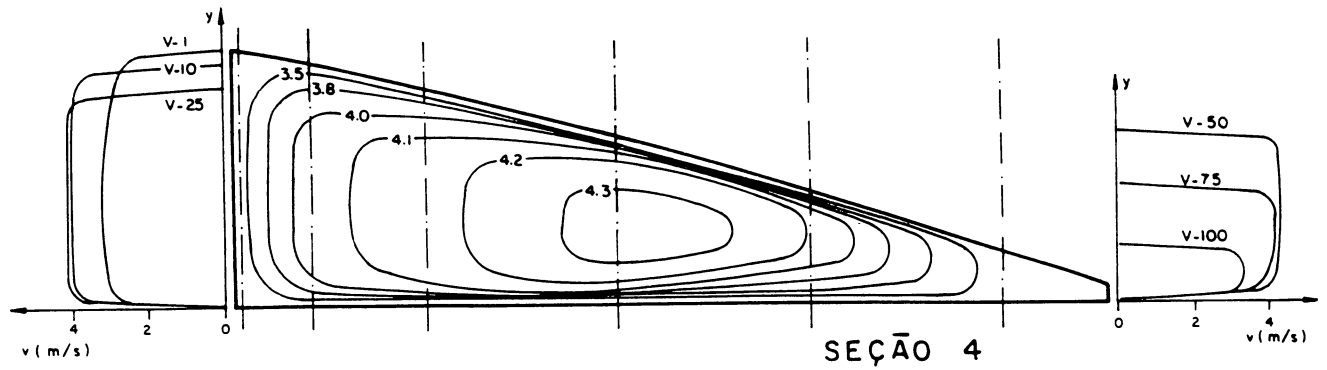
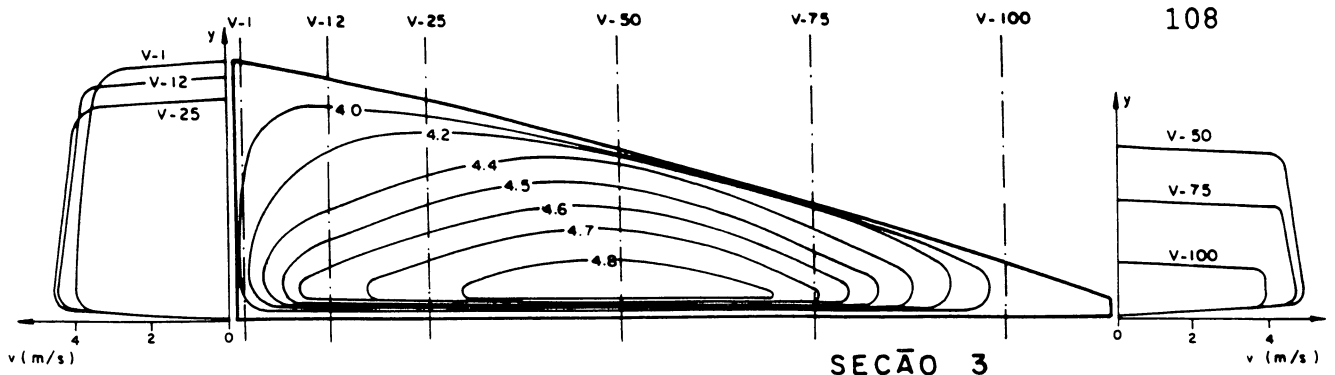


Figura 43 - Isótacas no duto de aeração - TESTE 02.

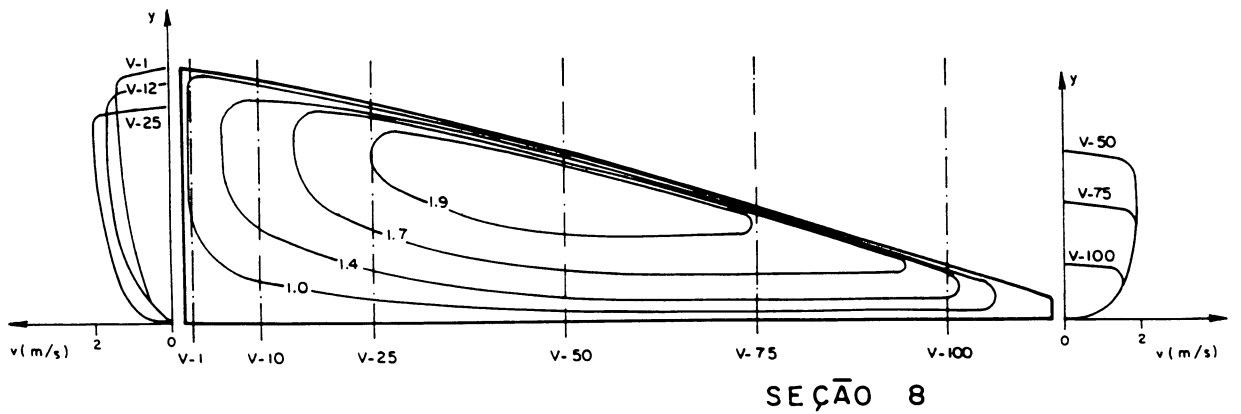
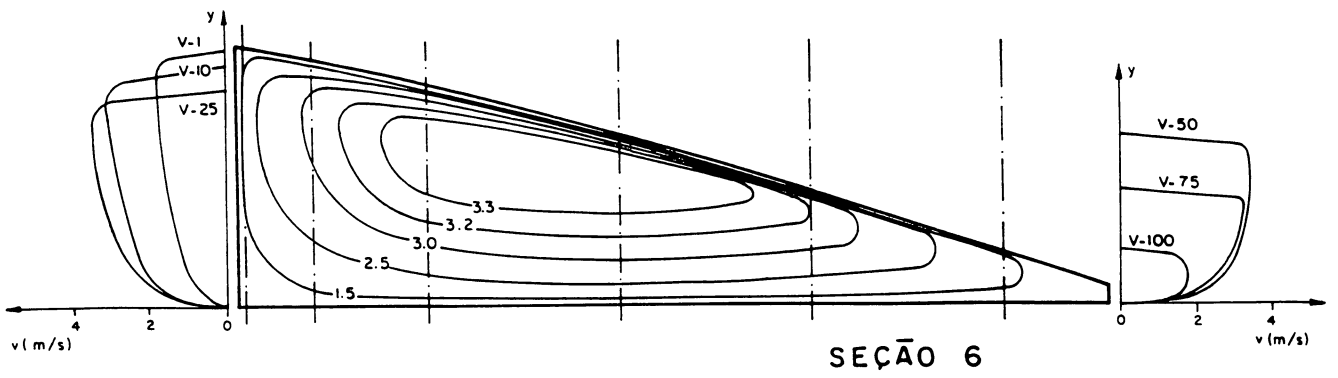
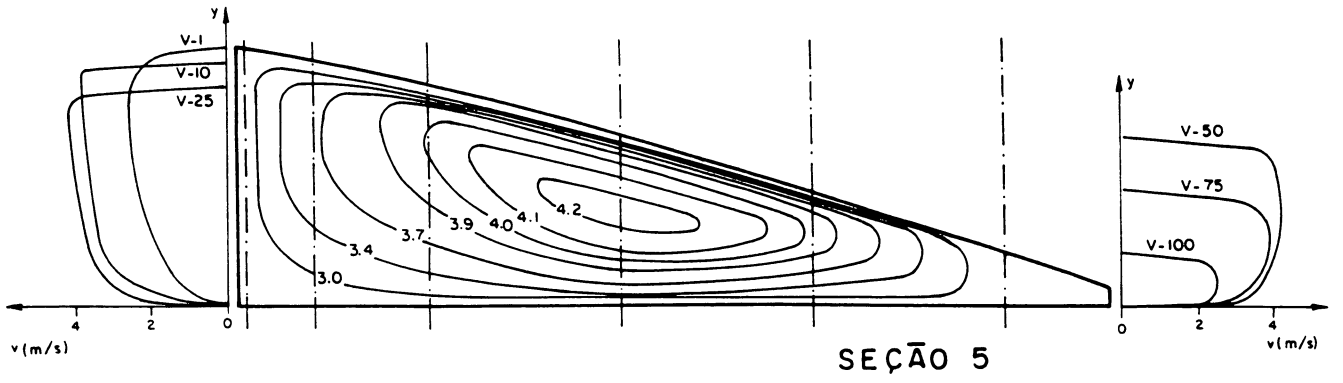
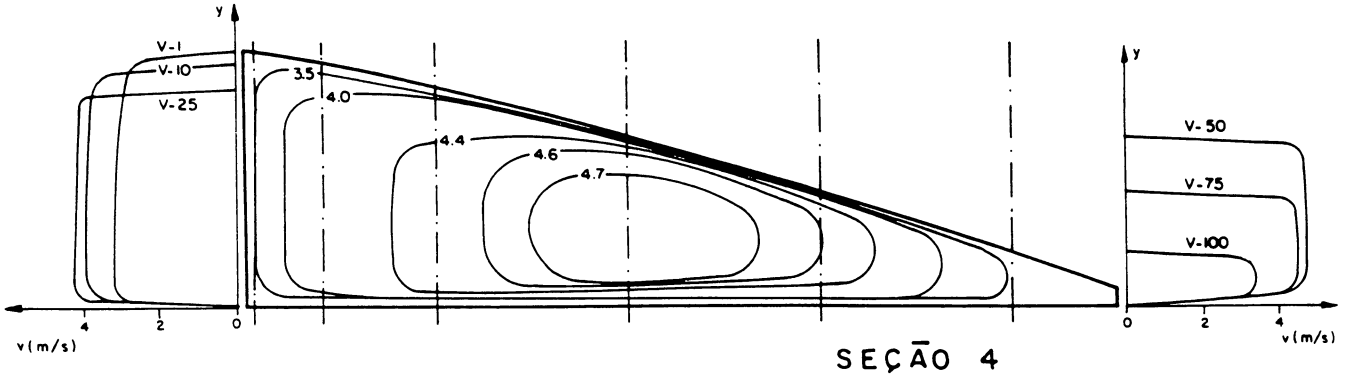
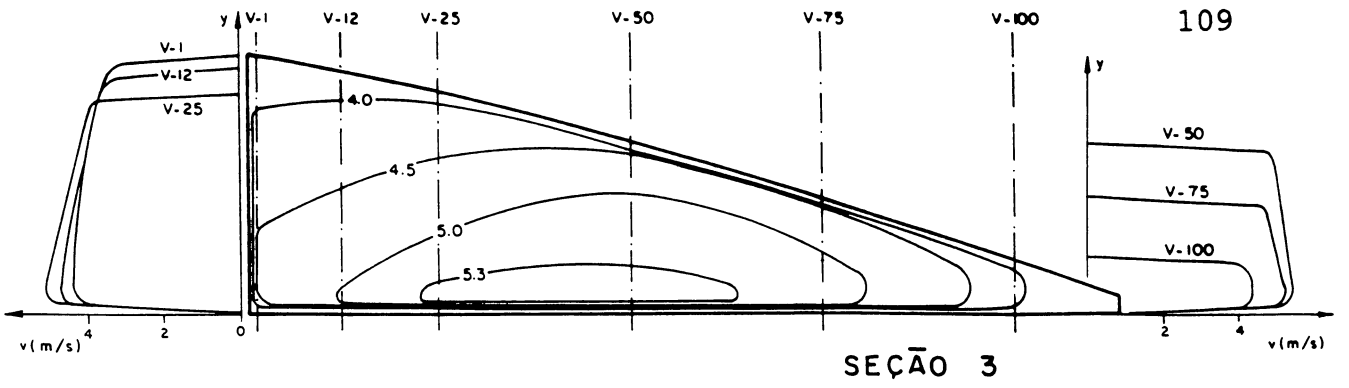


Figura 44 - Isótopas no duto de aeração - TESTE 03.

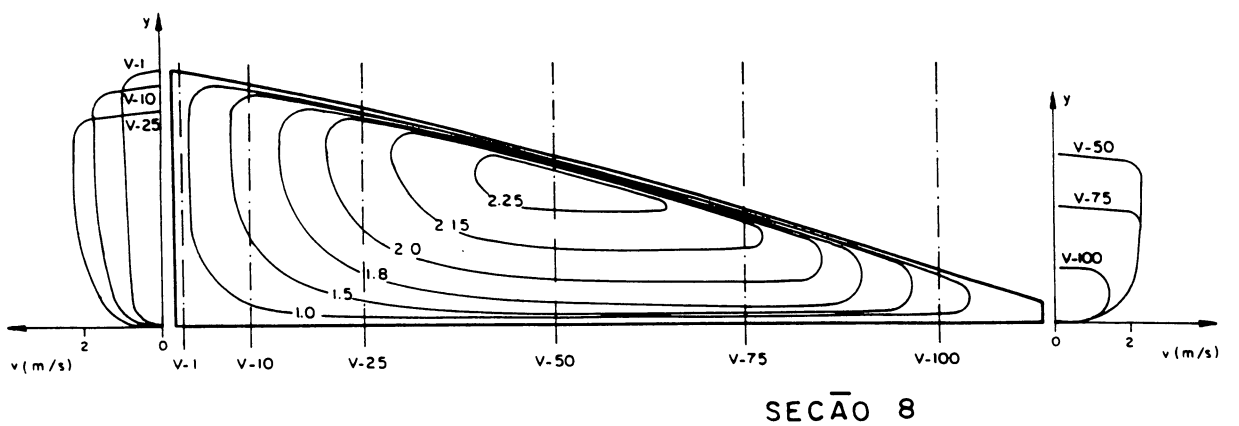
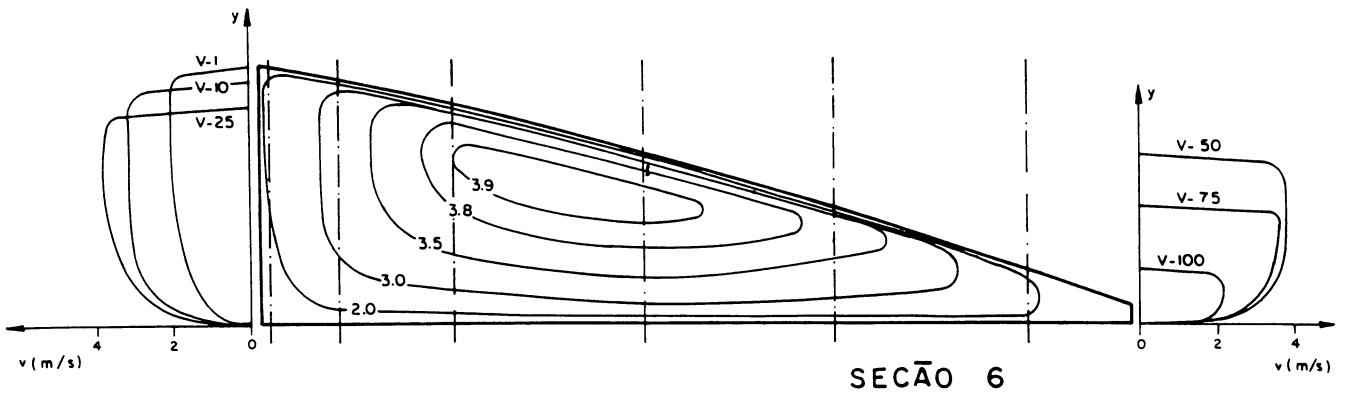
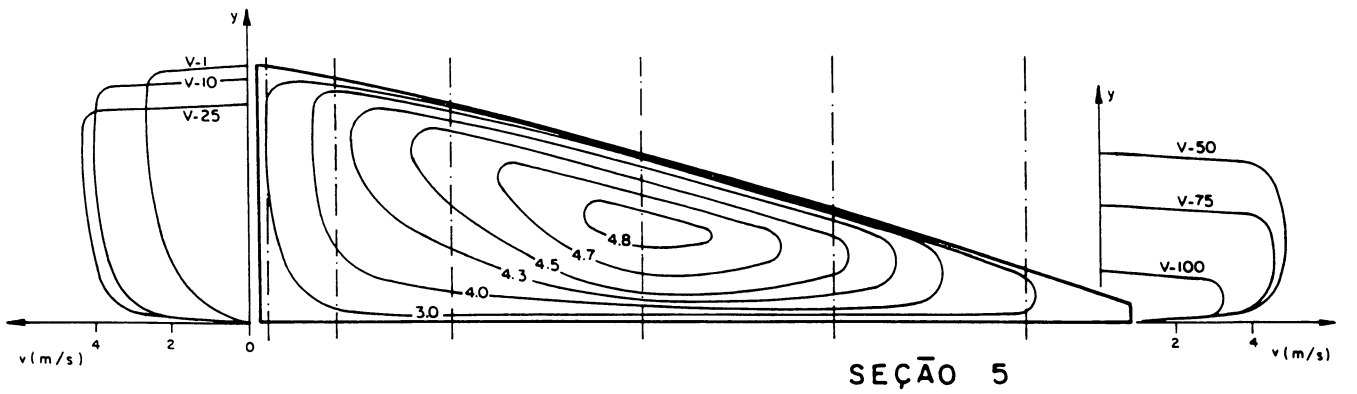
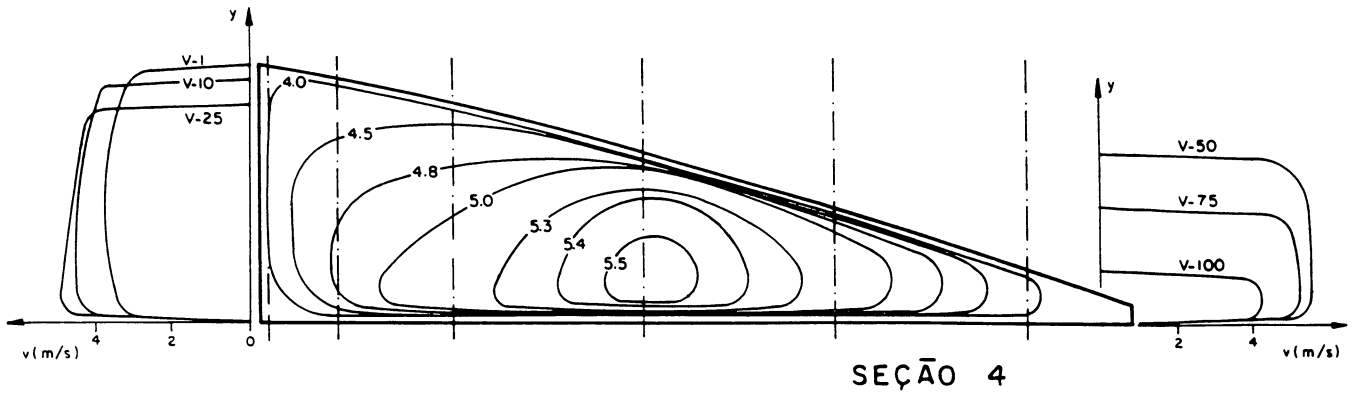
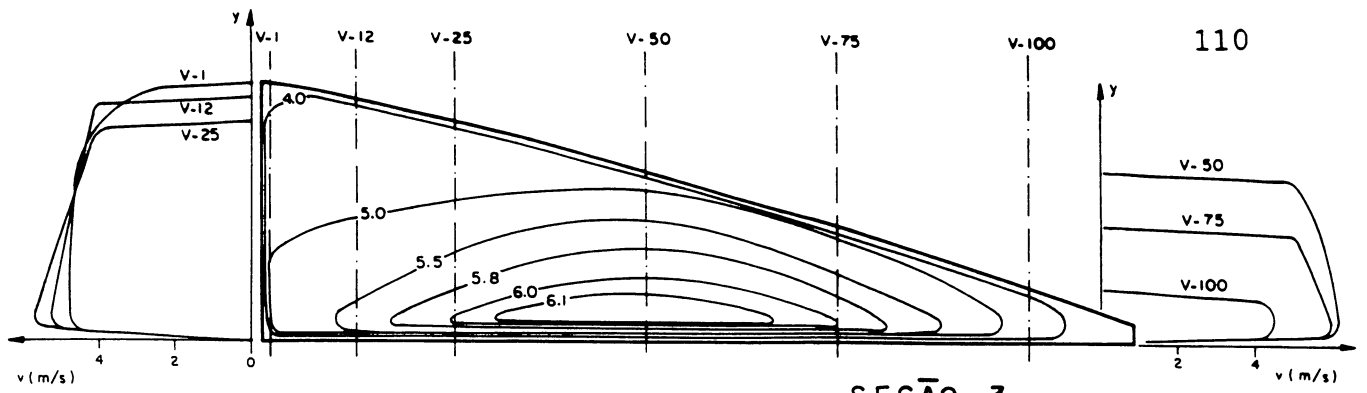


Figura 45 - Isótopas no duto de aeração - TESTE 04.

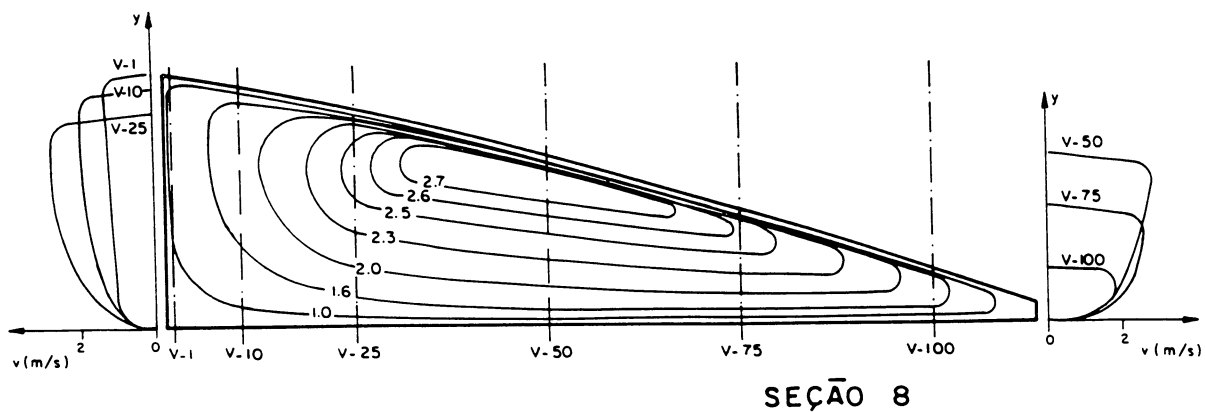
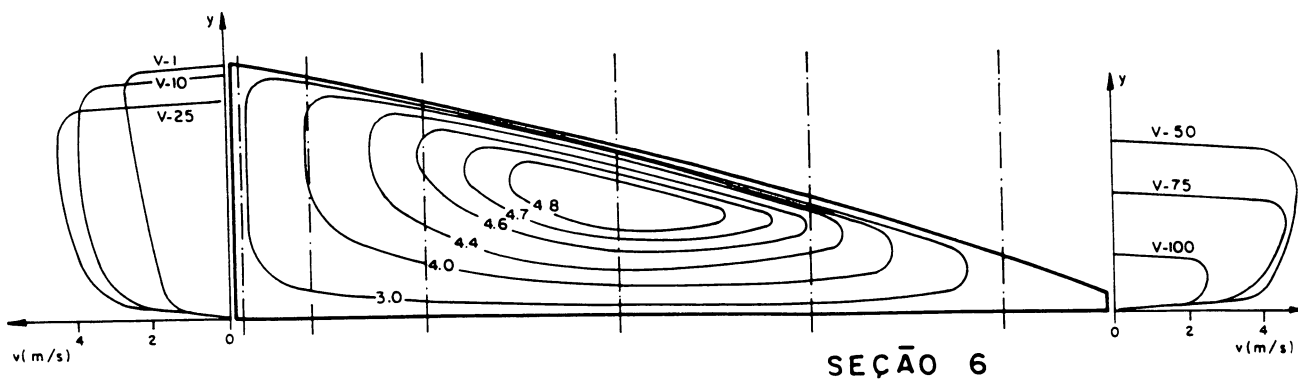
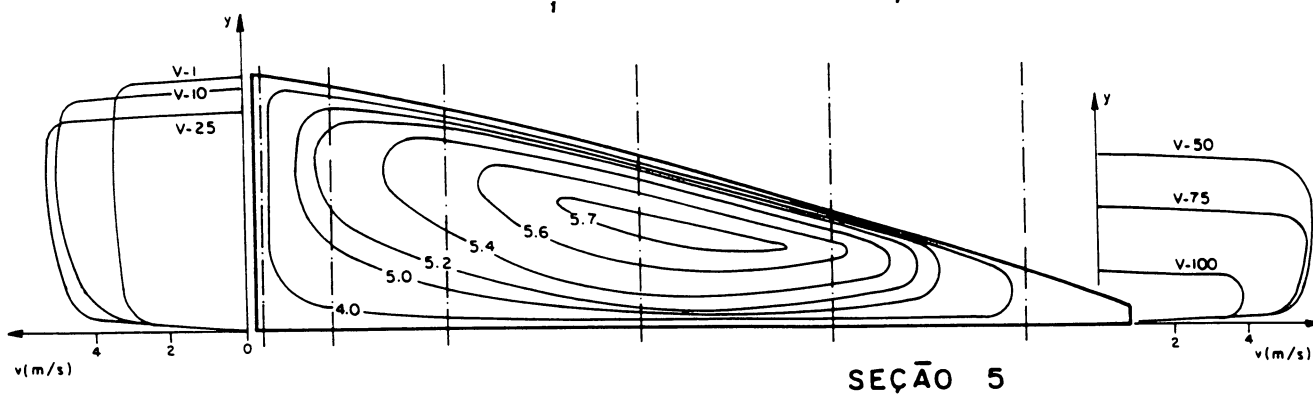
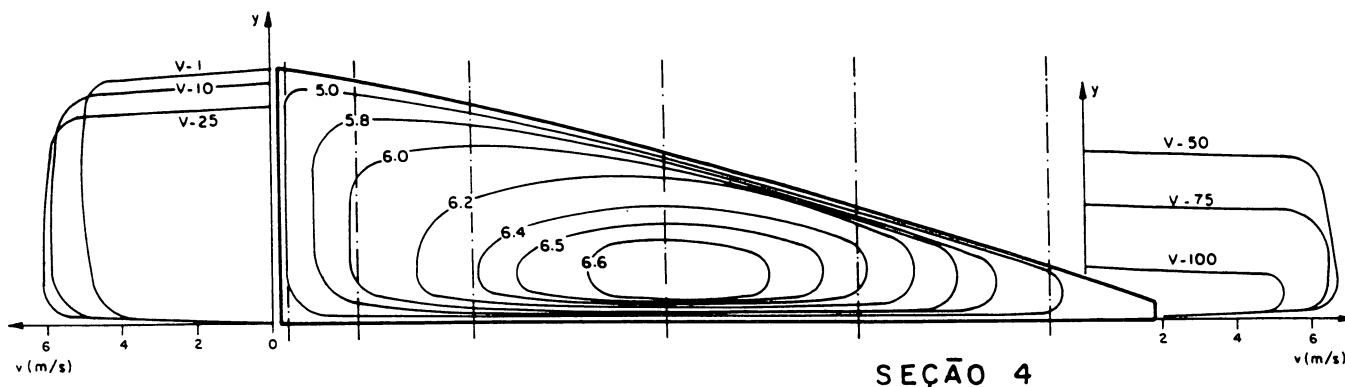
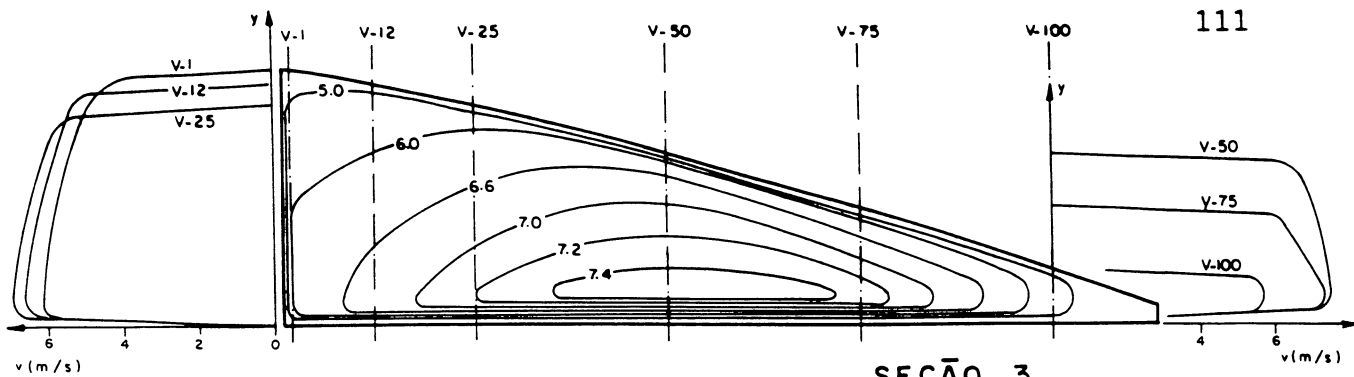


Figura 46 - Isótopas no duto de aerção - TESTE 05.

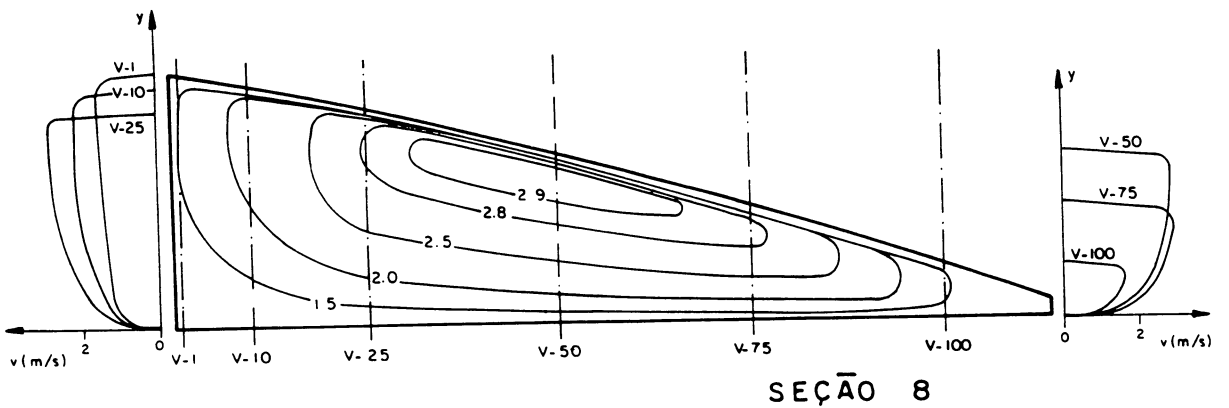
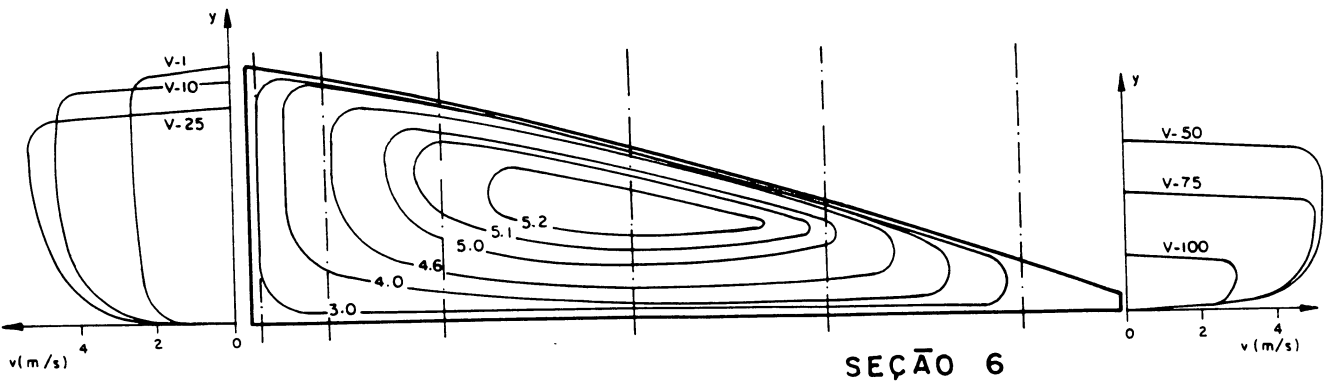
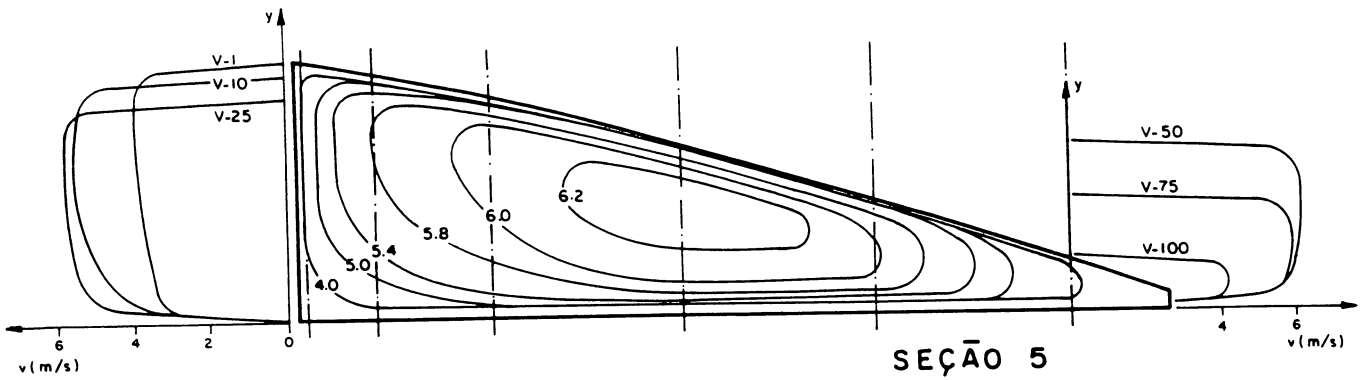
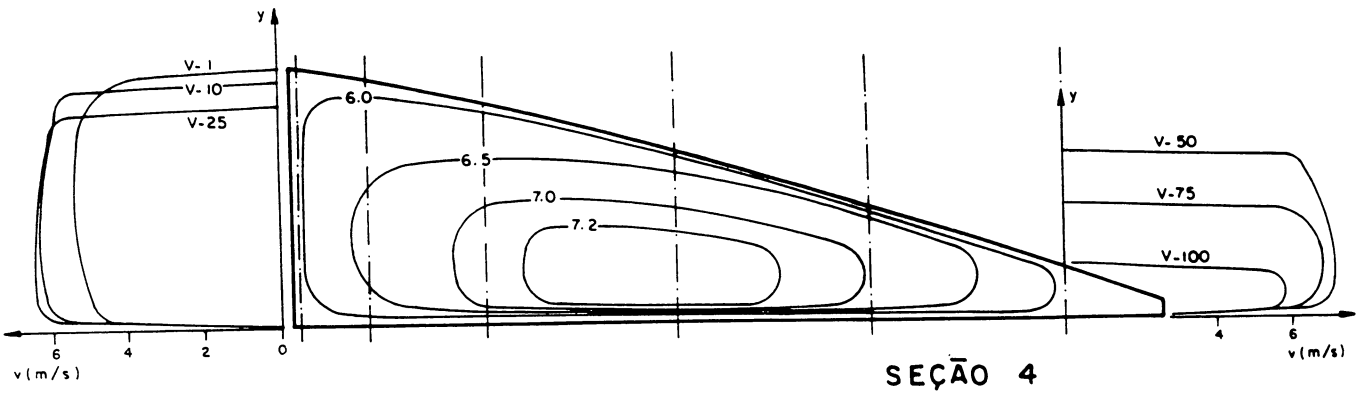
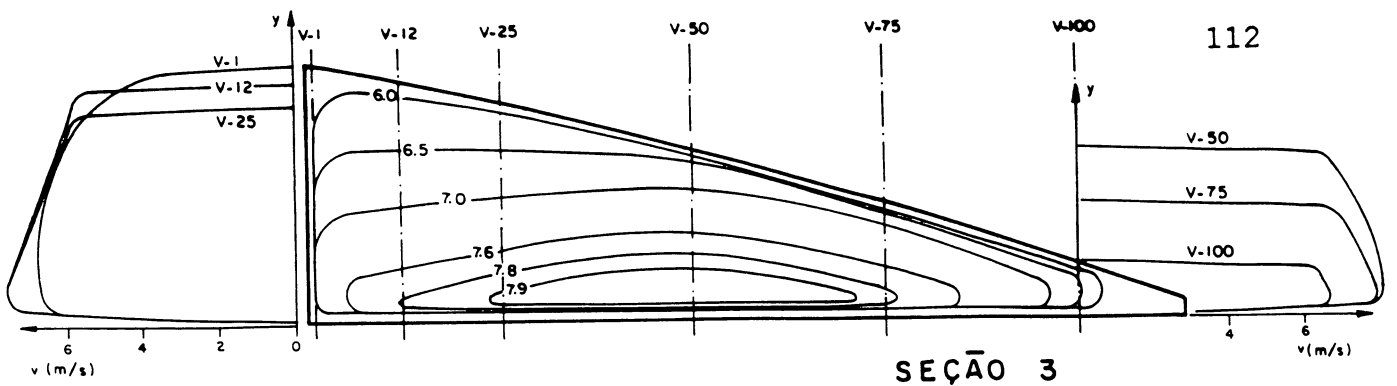


Figura 47 - Isótopas no duto de aeração - TESTE 06

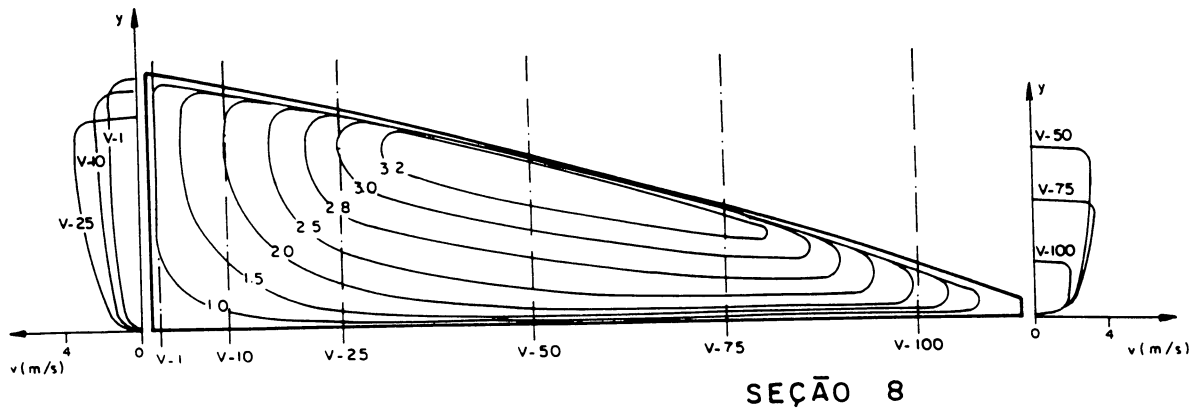
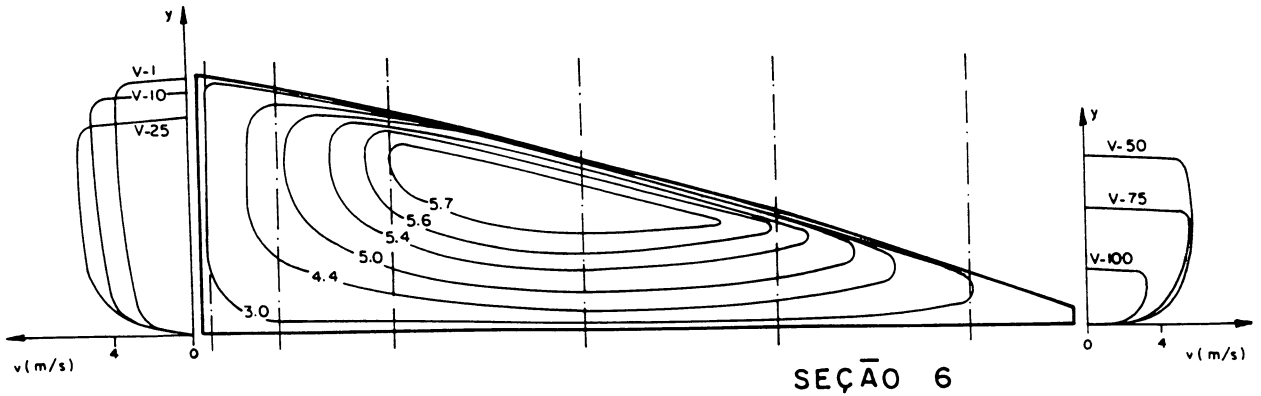
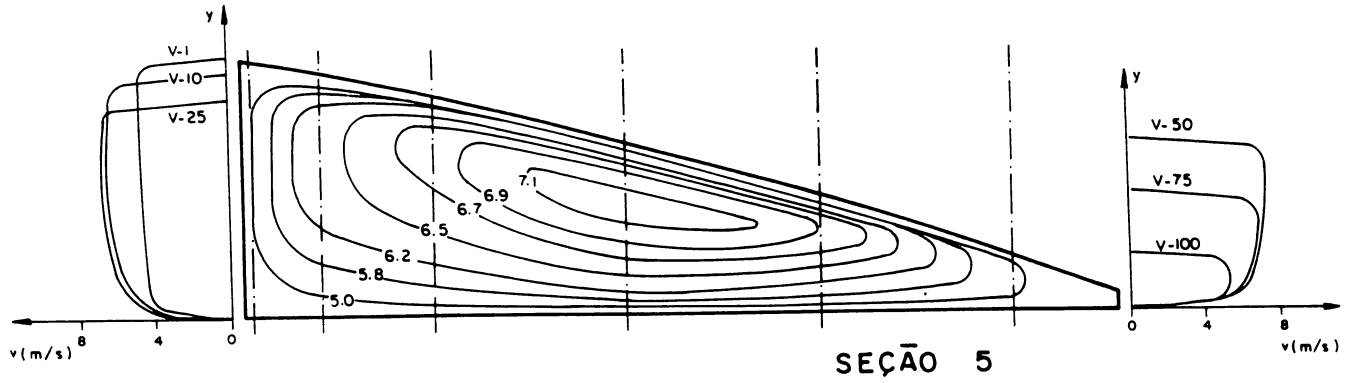
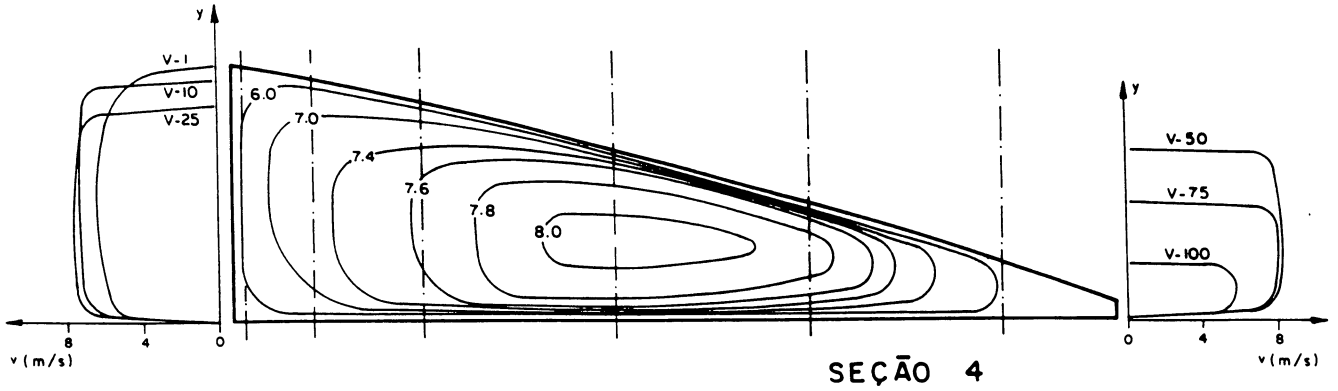
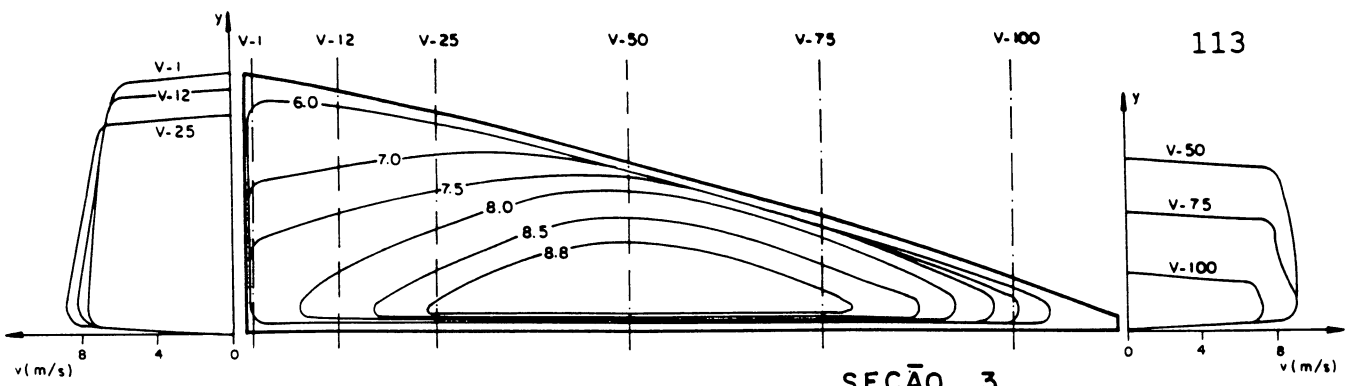


Figura 48 - Isótopas no duto de aeração - TESTE 07.

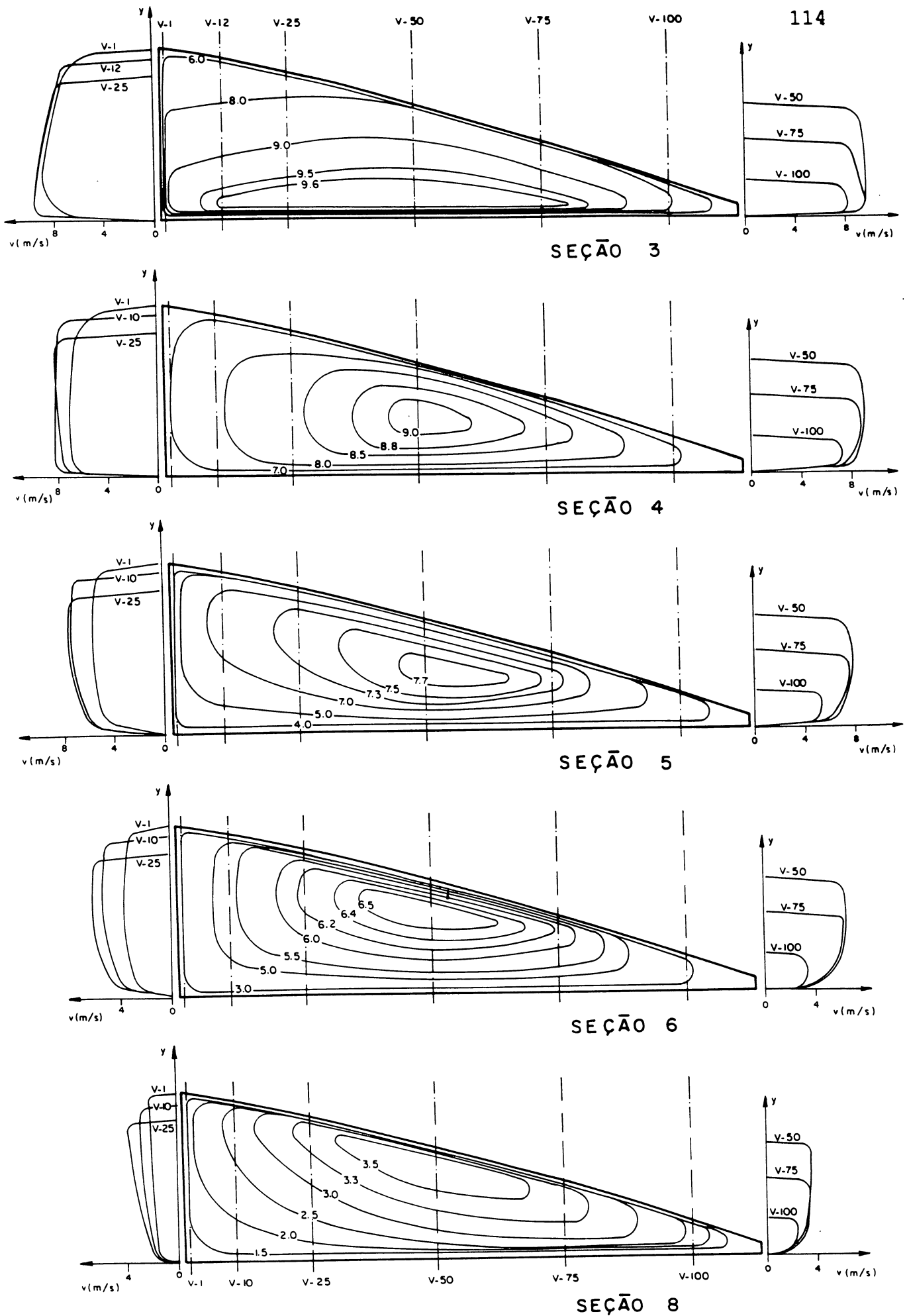


Figura 49 - Isótopas no duto de aeração - TESTE 08.

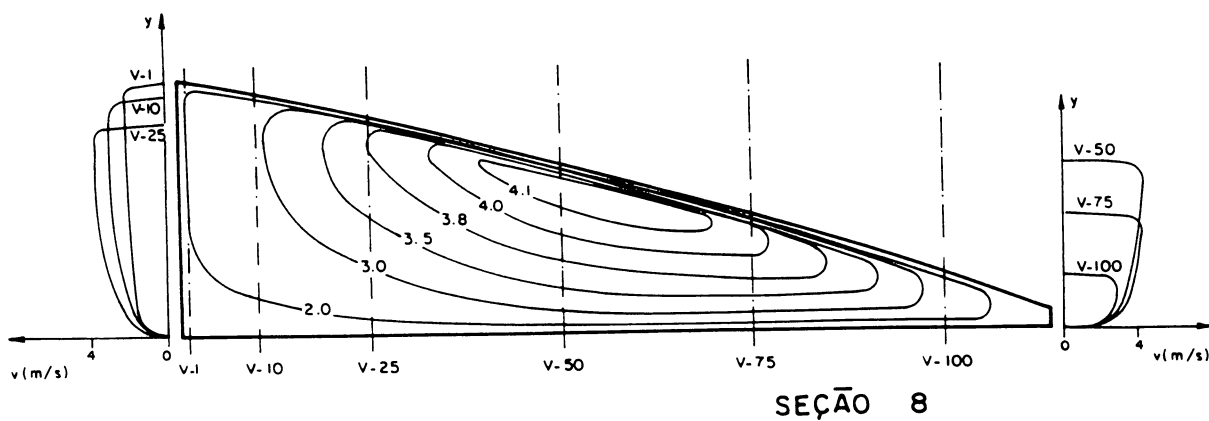
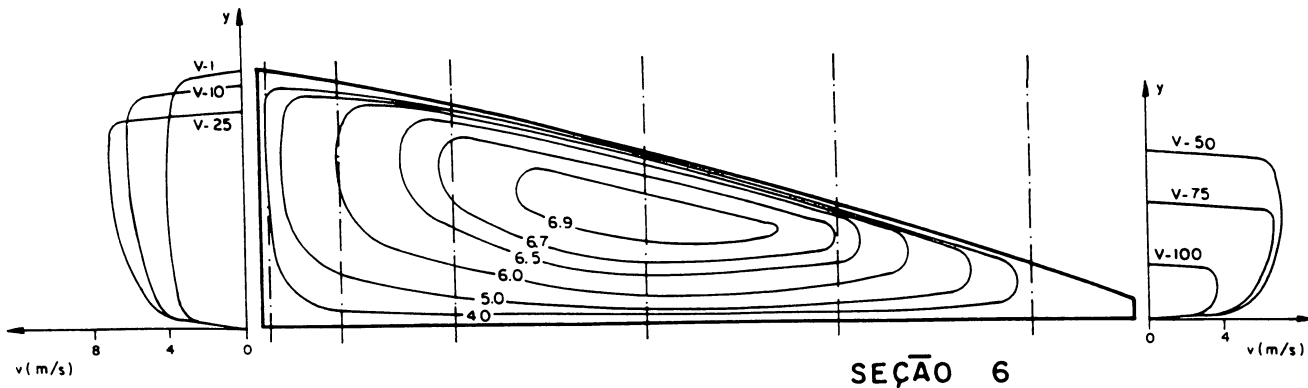
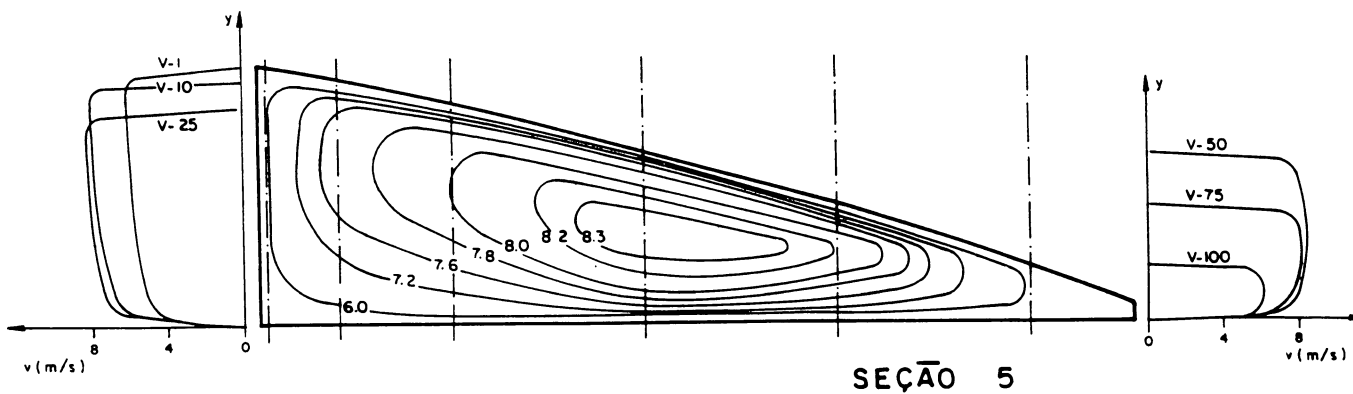
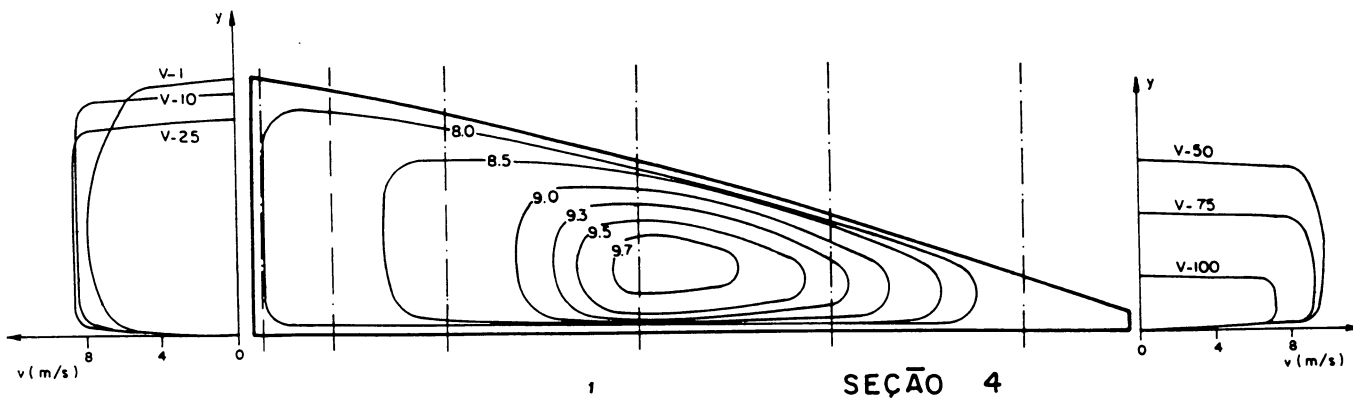
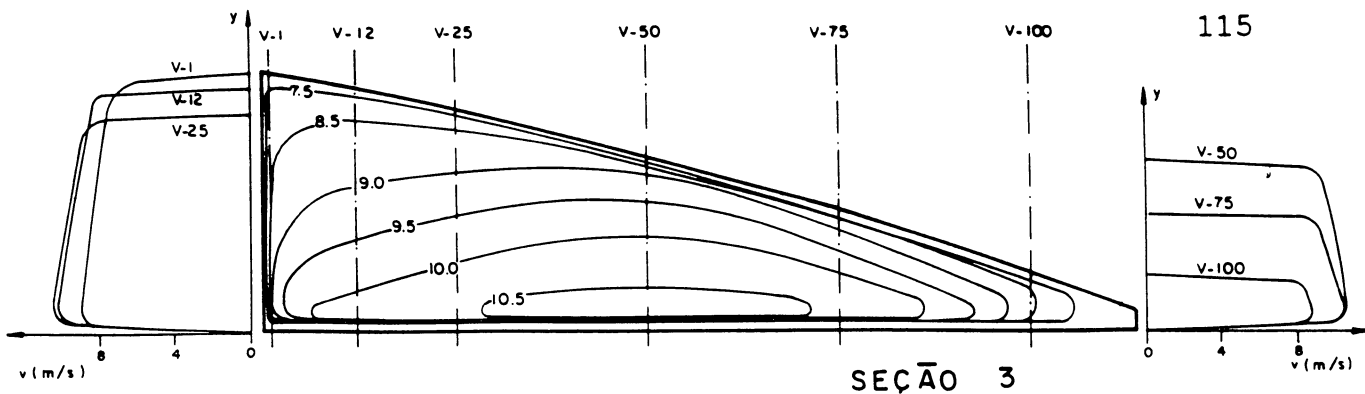


Figura 50 - Isótopas no duto de aeração - TESTE 09.

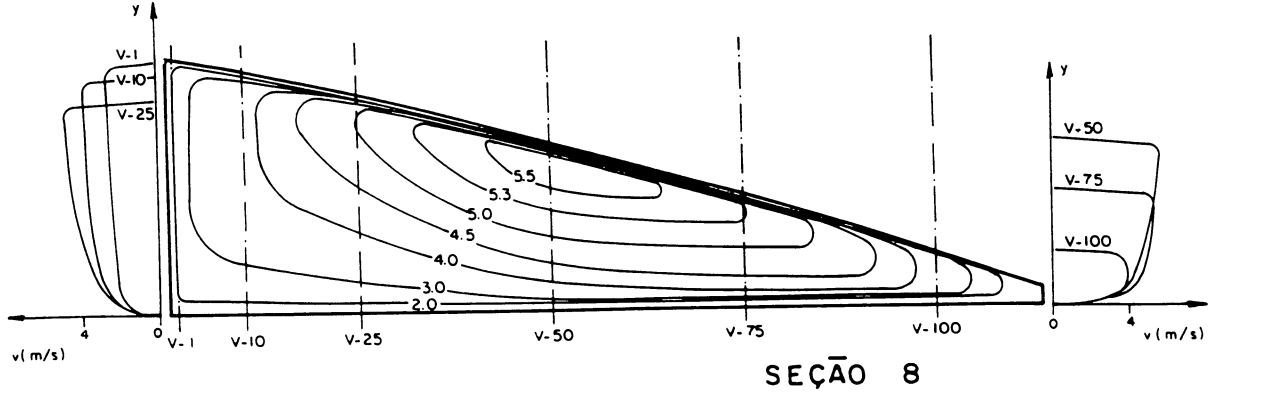
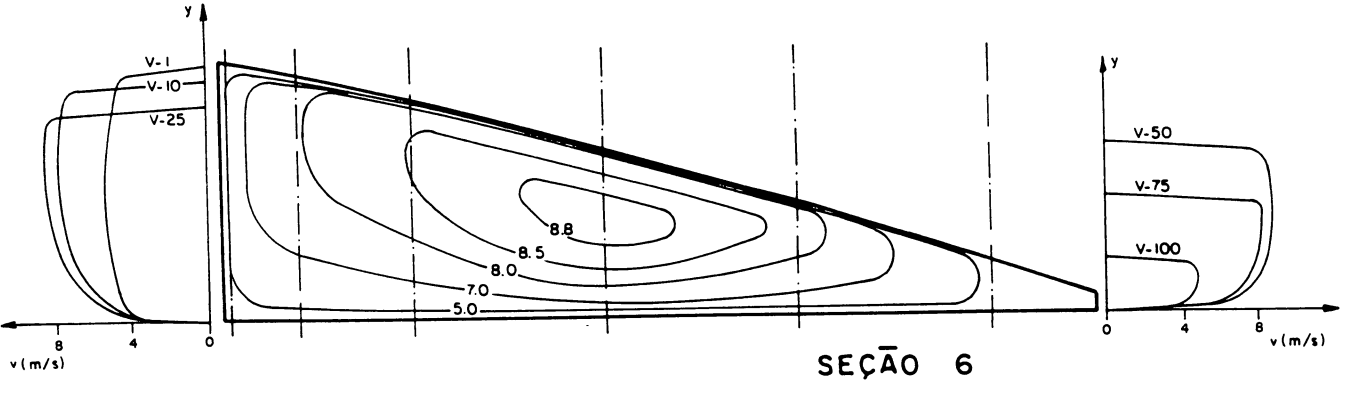
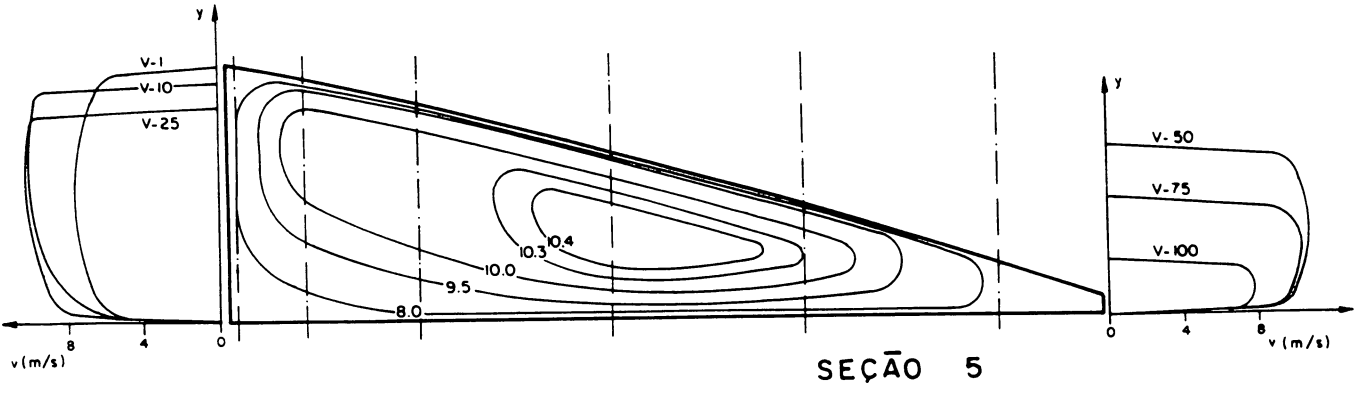
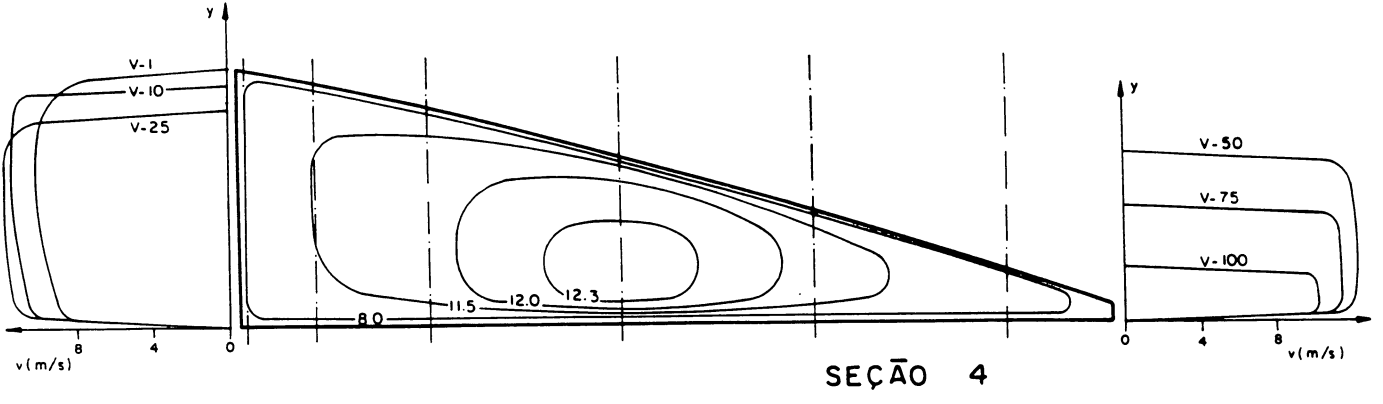
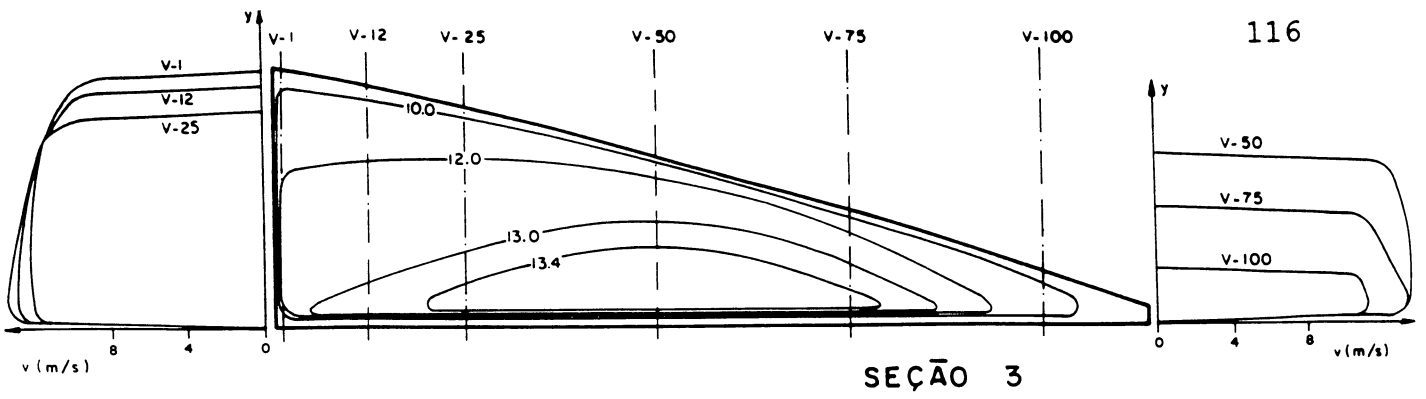
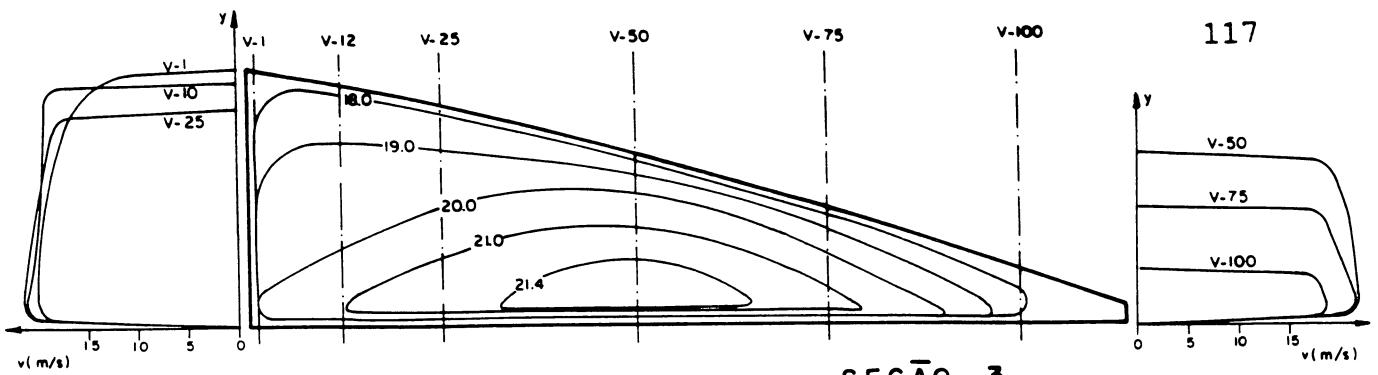
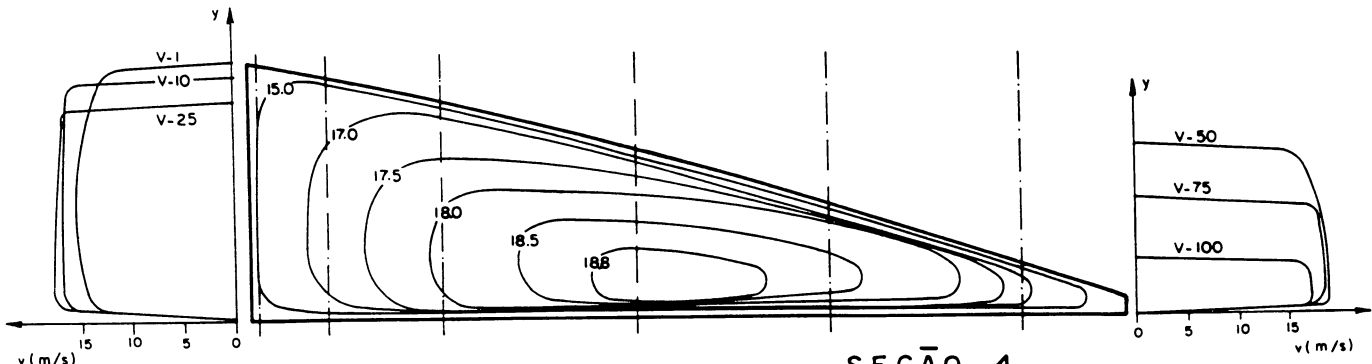


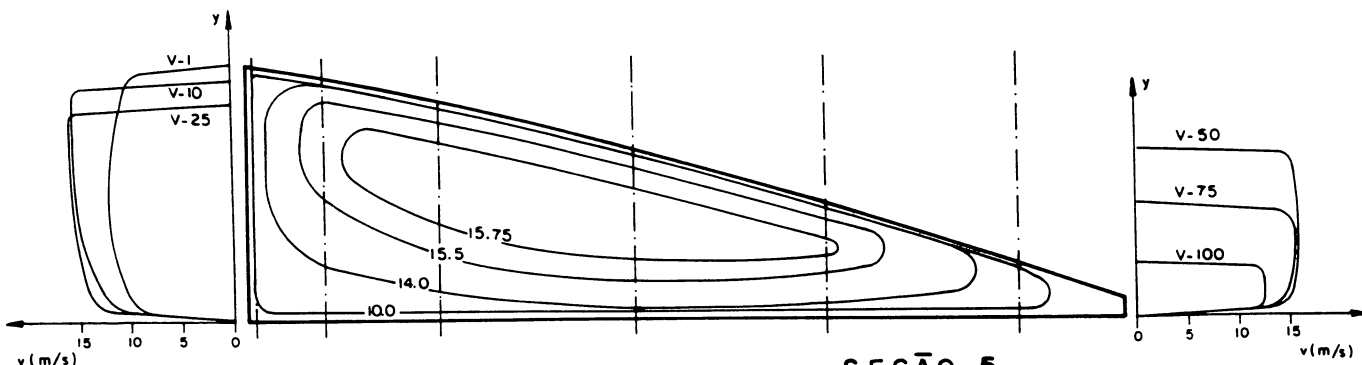
Figura 51 - Isótacas no duto de aeração - TESTE 10.



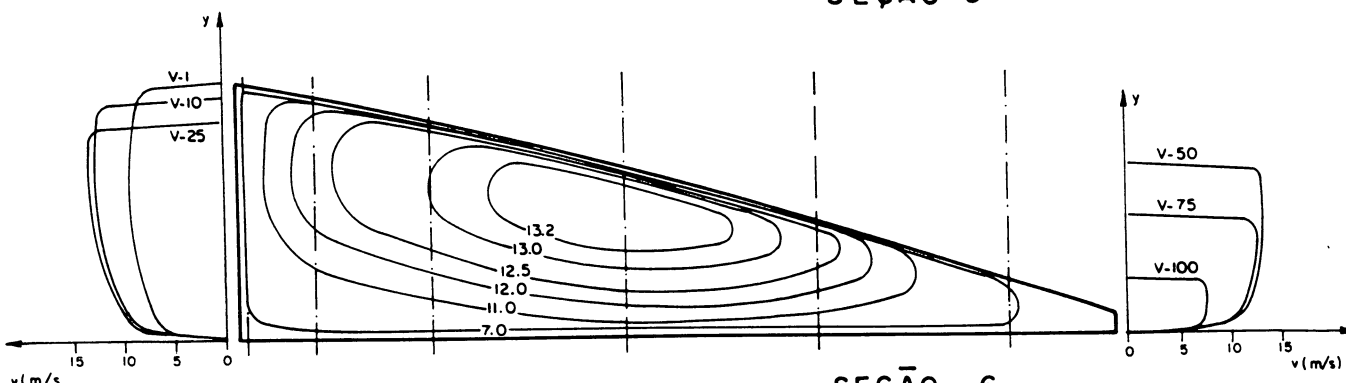
SEÇÃO 3



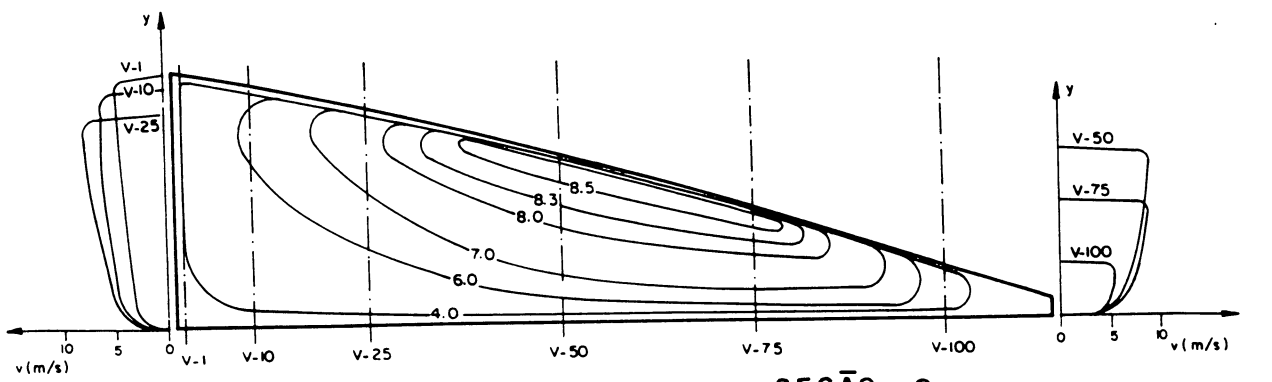
SEÇÃO 4



SEÇÃO 5



SEÇÃO 6



SEÇÃO 8

Figura 52 — Isótacas no duto de aerção - TESTE II.

ANEXO 4 - OBTENÇÃO DO COEFICIENTE  $K_{L3}$  PELO MÉTODO PROPOSTO POR  
I. E. IDEL'CIK

OBTENÇÃO DO COEFICIENTE  $K_{L3}$  PELO MÉTODO PROPOSTO POR I. E. IDEL'CIK

1) COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA NA CURVA

Parois rugueuses

$$\zeta = k_{\Delta} k_{Re} A_1 C_1 \zeta'$$

$$R_e = \frac{w_o b_{et}}{v} = \frac{Q \cdot 10^{-3} (22,60 / 9,0) \times 10^{-2}}{28,80 \times 10^{-4} \cdot 15,13 \times 10^{-6}} = 576 Q \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 3623 < R_e < 24703,$$

$$\Delta = 0,01 \text{ mm (Verre - tableau 2.1)}$$

$$\bar{\Delta} = \Delta / b_{et} = 0,01 / (2260 / 90) = 3,982 \times 10^{-4}$$

$$k_{\Delta} : \text{tableau 6-12 du diagramme 6.9} \Rightarrow k_{\Delta} = 1,0$$

$$k_{Re} : \text{tableau 6-12 du diagramme 6.9} \Rightarrow k_{Re} = 64\lambda$$

$$\text{diagramme 2.2} \Rightarrow \lambda = 0,3164 / R_e^{0,25}$$

$$k_{Re} = 20,2496 / R_e^{0,25}$$

$$A_1 : \text{diagramme 6.8} \Rightarrow \delta = 90^\circ \Rightarrow A_1 = 1,00$$

$$C_1 : \text{diagramme 6.8} \Rightarrow a_o / b_o = 9 / 3,6 = 2,5 \Rightarrow C_1 = 0,84$$

$$\zeta' : F_1 / F_0 = 22,60 / 28,80 = 0,785$$

$$r / b_{et} = 2 / (22,60 / 9,0) = 0,796$$

$$\text{diagramme 6.8} \Rightarrow \zeta' = 0,16$$

$$\zeta = 1,0 \cdot \frac{20,2496}{R_e^{0,25}} \cdot 1,00 \cdot 0,84 \cdot 0,16 = \frac{2,7215}{R_e^{0,25}}$$

## 2) COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA NO ESTRANGULAMENTO

$$\zeta = \zeta' \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right) + \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)^2 + 2\sqrt{\zeta' \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right) \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)}$$

$$\zeta' : r/D_H = 2/3,9226 = 0,5099$$

$$\text{diagramme 4.12} \Rightarrow \zeta' = 0,03$$

$$\zeta = 0,03 \left(1 - \frac{22,60}{28,80}\right) + \left(1 - \frac{22,60}{22,60}\right)^2 + 2\sqrt{0,03 \left(1 - \frac{22,60}{28,80}\right) \left(1 - \frac{22,60}{22,60}\right)} = 0,0065$$

3) COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA  $K_{L3}$ 

$$K_{L3} = \frac{2,7215}{R_e^{0,25}} + 0,0065$$

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1 - ÁVILA, Clóvis M. Aeração em fluxos de alta velocidade: influência das condições de escoamento no duto de aeração sobre o desempenho dos aeradores. Curitiba : UFPR, 1990. 150 p. Dissertação (Mestrado) - UFPR.
- 2 - DAILY, James W., HARLEMAN, Donald R. F. Fluid dynamics. Reading : Addison-Wesley, 1966. 454 p.
- 3 - DAVIS, C. V., SORENSEN, K. E. (Ed.) Handbook of applied hydraulics. 3. ed. New York : McGraw-Hill, 1969. p. 2.17-2.18
- 4 - GLAZOV, A. I. Calculation of the air-capturing ability of a flow behind an aerator ledge. Hydrotechnical Construction. v. 18, n. 11, p. 554-558, Nov. 1984.
- 5 - HOWE, J. W. Flow measurement. In: ROUSE, H. (Ed.) Engineering hydraulics. New York : J. Wiley, 1950. cap. 3

- 6 - IDEL'CIK, I. E. Memento des pertes de charge: coefficients de pertes de charge singulieres et de pertes de charge par frottement. Paris: Eyrolles, 1969. 494 p. (Collection du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou, 13).
- 7 - ITO, H., IMAI, K. Energy losses at 90 pipe junctions. J. of the Hydraulics Div., v. 99, n. 9, p. 1353-1368, Sept. 1973.
- 8 - MCNOWN, John S. Mechanics of manifold flow. Transactions of the ASCE, v. 119, p. 1103-1118, 1954.
- 9 - PINTO, Nelson L. de S., NEIDERT, Sinildo H., OTA, José J. Prototype and laboratory experiments of aeration at high velocity flows. Curitiba : CEHPAR, 1981. 23 p. (publicação nº 36)
- 10 - PINTO, Nelson L. de S., NEIDERT, Sinildo H. Air entrainment through aerators: mechanics and air flow evaluation. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH. Congress, 20., 1983, Moscu. Proceedings. Moscu, IAHR, 1983. v. 7, p. 366-369.

- 11 - PINTO, Nelson L. de S., Designing aerators for high velocity flow. Water Power and Dam Construction, v. 41, n. 7, p. 44-48, July 1989.
- 12 - SEMENKOV, V. M., LENTJAEV, L. D. Spillway dams with aeration of the flow over spillways. A separate paper of the XI Congress of International Commission on Large Dams. Madrid, June 1973.
- 13 - WOOD, Ian R. Air! water flows. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH. Congress, 21., 1985, Melbourne. Proceedings. Barton, Australia : Institution of Engineers, 1985. V. 5, p. 18-29.

