

SIMULAÇÃO AERODINÂMICA EM TÚNEIS
DE METRÔ, TIPO COURAÇA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO AERODINÂMICA EM TÚNEIS
DE METRÔ, TIPO COURAÇA

Autor: SERGIO VALDIR BAJAY

Orientador: JOAQUIM SEVERINO DE PAIVA NETTO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Campinas da UNICAMP como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

DEZEMBRO DE 1976

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

P R E F Á C I O

As elevadas taxas de crescimento de diversas metrópoles no Brasil vem ocasionando sérios problemas de transporte urbano, em cuja solução, a médio e longo prazo, os sistemas de transporte rápido desempenham um importante papel. A utilização econômica destes sistemas impõe problemas técnicos cujas soluções dependem de avançadas pesquisas tecnológicas.

O presente estudo visa criar uma ferramenta de análise, que possibilite uma compreensão clara do comportamento aerodinâmico em túneis de Metrô, com via única. Espera-se que este trabalho, propicie um sensível progresso no desenvolvimento de técnicas para otimização do controle do meio ambiente, em sistemas urbanos de transporte rápido.

Í N D I C E

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	iv
NOMENCLATURA	ix
SUMÁRIO	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 O Problema da Tese	3
1.3 Resenha Literária	4
1.3.a Estudos assumindo fluido incompressível - Baixas velocidades	4
1.3.b Estudos assumindo fluido compressível - Al- tas velocidades	7
2. FORMULAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 Escolha do Modelo Físico	10
2.2 Elaboração do Modelo Matemático	11
2.2.a Campo de velocidades e pressões	11
(i) Equações básicas	11
(ii) Condições de contorno	20
(iii) Condições iniciais	22
2.2.b Força de arrasto aerodinâmico	23
2.3 Considerações sobre os dados experimentais concer- nentes às perdas de carga	28
3. RESOLUÇÃO NUMÉRICA	30
3.1 Aproximação por diferenças finitas	30
3.2 Método dos intervalos de tempo especificados	33
3.3 Cruzamento das linhas características com as curvas distância-tempo do veículo	35
3.3.a Equações da intersecção	35
3.3.b Condições do cruzamento	38

	Pág.
3.4 Análise dos pontos extremos	40
3.4.a Entrada do túnel	41
3.4.b Saída de exaustão	41
3.4.c Poço de alívio	46
3.4.d Saída do túnel	47
3.5 Método dos mínimos quadrados com restrições	48
3.6 Programa para computador digital	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	81
REFERÊNCIAS	83
APÊNDICE - Dados experimentais	147

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>		<u>PÁGINA</u>
1	Esquema do Modelo Físico Adotado Neste Trabalho	87
2	Linhas Características	87
3	Posições Relativas Entre as Curvas Características e as Curvas Distância-Tempo da Frente e Traseira do Veículo	88
4	Fluxograma Básico	89
5	Curva Característica dos Ventiladores de Exaustão ..	96
6	Mudança da Posição da Frente do Trem com o Tempo, no Trajeto entre as Estações	97
7	Variação da velocidade do Trem com o Tempo, no Trajeto entre as Estações	98
8	Distribuição da Força de Arrasto Aerodinâmico Com o Tempo Durante a Passagem do Trem Pelo Túnel, Devido Somente ao Efeito de Pistão	99
9	Distribuição da Força de Arrasto Aerodinâmico com o Tempo Durante a Passagem do Trem pelo Túnel, Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	100
10	Mudança da vazão Média do Ar entre a Entrada do Túnel e a Saída de Exaustão com o Tempo, Devido Somente ao efeito de Pistão	101
11	Mudança da Vazão Média do Ar Entre a Entrada do Túnel e a Saída de Exaustão com o Tempo, Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	102
12	Mudança da Vazão Média do Ar entre a Saída de Exaustão e o Poço de Alívio com o Tempo, Devido Somente ao Efeito de Pistão	103
13	Mudança da Vazão Média do Ar entre a Saída de Exaustão e o Poço de Alívio com o Tempo, Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	104
14	Mudança da Vazão Média do Ar entre o Poço de Alívio e a Saída do Túnel com o Tempo, Devido somente ao Efeito de Pistão.	105

FIGURA

PÁGINA

15	Mudança da Vazão Média do Ar entre o Poço de Alívio e a Saída do Túnel com o Tempo, Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	106
16	Mudança da Vazão do Ar na Saída de Exaustão com o Tempo, Devido somente ao Efeito de Pistão	107
17	Mudança da Vazão do Ar na Saída de Exaustão com o Tempo, Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	108
18	Mudança da Vazão do Ar no Poço de Alívio com o Tempo, Devido somente ao Efeito de Pistão	109
19	Mudança da Vazão do Ar no Poço de Alívio com o Tempo, Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	110
20	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=5,4$ seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	111
21	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=5,4$ seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação forçada	112
22	Distribuição da Pressão do ar ao Longo do Túnel para $T=5,4$ seg., devido somente ao Efeito de Pistão..	113
23	Distribuição da Pressão do ar ao Longo do Túnel para $T=5,4$ seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada.	114
24	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=16,2$ seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	115
25	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=16,2$ seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	116
26	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para $T=16,2$ seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	117
27	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para $T=16,2$ seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada.	118

FIGURA

PÁGINA

28	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=27,0$ seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	119
29	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=27,0$ seg. Devido ao efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	120
30	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para $T=27,0$ seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	121
31	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para $T=27,0$ seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	122
32	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=37,8$ seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	123
33	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=37,8$ seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	124
34	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para $T=37,8$ seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	125
35	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para $T=37,8$ seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	126
36	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=48,6$ seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	127
37	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=48,6$ seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	128
38	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para $T=48,6$ seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	129
39	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para $T=48,6$ seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	130
40	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=59,4$ seg., Devido somente ao efeito de Pistão	131

FIGURA

PÁGINA

41	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para T=59,4 seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	132
42	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para T=59,4 seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	133
43	Distribuição da Pressão do ar ao Longo do Túnel para T=59,4 seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	134
44	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para T=86,4 seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	135
45	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para T=86,4 seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	136
46	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para T=86,4 seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	137
47	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para T=86,4seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	138
48	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para T=129,6 seg., Devido somente ao Efeito de Pistão.	139
49	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para T=129,6 seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	140
50	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para T=129,6 seg., Devido somente ao Efeito de Pistão.	141
51	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para T=129,6 seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	142
52	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para T=172,8 seg., Devido somente ao Efeito de Pistão	143

FIGURA

PÁGINA

53	Distribuição da Velocidade do Ar ao Longo do Túnel para $T=172,8$ seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	144
54	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para $T=172,8$ seg., Devido somente ao efeito de Pistão	145
55	Distribuição da Pressão do Ar ao Longo do Túnel para $T=172,8$ seg., Devido ao Efeito de Pistão mais Ventilação Forçada	146

N O M E N C L A T U R A

SÍMBOLOS		DESCRIÇÃO	UNIDADES
No texto	No programa		
a	A	Velocidade do som no ar	m/seg
A ₄	A4	Área transversal ao escoamento na saída de exaustão	m ²
A ₅	A5	Área transversal ao escoamento no poço de alívio	m ²
C _e , K _e	CE, AKE	Coeficientes relacionados às perdas de carga na frente do veículo	
C _{ec} , K _{ec}		Coeficientes relacionados às perdas de carga na frente do veículo, por contração do fluxo de ar	
C _{ee} , K _{ee}		Coeficientes relacionados às perdas de carga na frente do veículo, por expansão do fluxo de ar	
C _w , K _w	CW, AKW	Coeficientes relacionados às perdas de carga na traseira do veículo	
C _{wc} , K _{wc}		Coeficientes relacionados às perdas de carga na traseira do veículo, por contração do fluxo de ar	
C _{we} , K _{we}		Coeficientes relacionados às perdas de carga na traseira do veículo, por expansão do fluxo de ar.	
C _p /C _v		Relação de calores específicos para o ar.	
D _{h4}	DIH4	Diâmetro hidráulico dos dutos de exaustão	m
D _{h5}	DIH5	Diâmetro hidráulico do poço de alívio.	m
D _t	DIT	Diâmetro do túnel	m
D _v	DIV	Diâmetro do veículo	m
e		Coeficiente que considera o efeito de mais de um túnel no	

SÍMBOLOS		DESCRIÇÃO	UNIDADES
No texto	No programa		
		fluxo de exaustão	
F_D	$FD(I)$	Força de arrasto total	N
F_{D_B}		Arrasto de base	N
F_{D_e}		Componente da força de arrasto na zona de entrada	N
F_{D_f}		Componente da força de arrasto devido ao cisalhamento na parede do veículo	N
F_{D_N}		Arrasto de forma	N
F_{D_P}		Componente da força de arrasto devido às pressões	N
$F_{D_{PD}}$		Arrasto devido a diferença de pressões na zona de transferência	N
F_{D_W}		Componente da força de arrasto na zona de esteira	N
$FIPO$	$FIPO$	Coefficiente de atrito assumido como referência na fórmula de Colebrook-white, em relação à saída de exaustão e poço de alívio	
$FITR$	$FITR$	Coefficiente de atrito assumido como referência na fórmula de colebrook-white, em relação à zona de transferência	
f_t	FT	Coefficiente de atrito na parede do túnel, na região distante do veículo	
f_{t_R}	FTR	Coefficiente de atrito na parede do túnel, na região distante do veículo; calculado em relação a característica C^+	
f_{t_s}	FTS	Coefficiente de atrito na parede do túnel, na região distante do veículo; calculado em relação à característica C^-	
f_v	FV	Coefficiente de atrito na parede do trem, na zona de transferência	

SÍMBOLOS		DESCRIÇÃO	UNIDADES
No texto	No programa		
f_{VR}	FVR	Coeficiente de atrito na <u>pare</u> de do trem, na zona de trans- ferência; calculado em rela- ção a característica C^+	
f_{VS}	FVS	Coeficiente de atrito na <u>pare</u> de do trem, na zona de trans- ferência; calculado em rela- ção a característica C^-	
f_{VV}	FVV	Coeficiente de atrito na <u>pare</u> de do trem, nas estações	
f_w	FW	Coeficiente de atrito na <u>pare</u> de do túnel, na zona de trans- ferência	
f_{wR}	FWR	Coeficiente de atrito na <u>pare</u> de do túnel, na zona de trans- ferência; calculado em rela- ção a característica C^+	
f_{wS}	FWS	Coeficiente de atrito na <u>pare</u> de do túnel, na zona de trans- ferência; calculado em rela- ção a característica C^-	
f_4	F4	Coeficiente de atrito na <u>pare</u> de dos dutos de exaustão	
f_5	F5	Coeficiente de atrito na <u>pare</u> de do poço de alívio	
g_{i1}, g_{i2} g_{i3}, g_{i4}	$G(I,1), G(I,2),$ $G(I,3), G(I,4)$	Coeficiente dos polinômios de ajuste da curva característi- ca dos ventiladores	
HLe_c		Perda de carga devido a con- tração do fluxo de ar na fren- te do veículo	m
HLe_e		Perda de carga devido a expan- são do fluxo de ar na frente do veículo	m
HWAY	HWAY	Intervalo de tempo entre a passagem de dois trens consecu- tivos	seg.
K		Módulo de elasticidade do ar	kg/m seg ⁴
Kent		Coeficiente relacionado à per	

SÍMBOLOS		DESCRIÇÃO	UNIDADES
No texto	No programa		
		da de carga na entrada do túnel	
KPA	KPA	Indicador da existência de poço de alívio no túnel	
KVF	KVF	Indicador da existência de ventilação forçada	
L_{aa}		Distância entre o poço de alívio e a saída do túnel	m
L_t	ALT	Comprimento do túnel	m
L_v	ALV	Comprimento do veículo	m
L_{4eq}	ALEQ4	Comprimento equivalente dos dutos de exaustão	m
L_{5eq}	ALEQ5	Comprimento equivalente do poço de alívio	m
n_{aa}	NAA	Coefficiente indicador da posição ocupada pelo poço de alívio na malha	
NPT	NPT	Número de períodos no tempo a serem analisados	
P		Notação genérica para a pressão do ar no sistema	N/m ²
P_{atm}		Pressão atmosférica	N/m ²
P_b, P_c, P_d		Pressões relativas às secções <u>b, c, d, e, f, e i</u> da fig.1	N/m ²
P_e, P_f, P_i		Pressões do ar na secção <u>g</u> da fig 1, relativas aos trechos 1 e 2 do túnel	N/m ²
P_{g1}, P_{g2}		Pressões do ar na secção <u>h</u> da fig 1, relativas aos trechos 2 e 3 do túnel	N/m ²
P_{h2}, P_{h3}		Pressão do ar em um ponto genérico de malha	N/m ²
PP_1	P1(I,J)	Pressão do ar para um ponto da malha situado no trecho 1	N/m ²
PP_2	P2(I,J)	Pressão do ar para um ponto da malha situado no trecho 2	N/m ²
PP_3	P3(I,J)	Pressão do ar para um ponto da malha situado no trecho 3	N/m ²
P_R	PR	Pressão do ar na característi-	

SÍMBOLOS		DESCRIÇÃO	UNIDADES
No texto	No programa		
		ca C^+ (fig.2)	N/m^2
P_S	PS	Pressão do ar na característi- ca C^- (fig.2)	N/m^2
P_4		Pressão do ar no ponto da ma- lha abaixo da saída de exaus- tão	N/m^2
P_5		Pressão do ar no ponto da ma- lha abaixo do poço de alívio	N/m^2
$(\Delta p)_e$		Diferença de pressão na zona de entrada	N/m^2
$(\Delta p)_{ent}$		Perda de carga na entrada do túnel	N/m^2
$(\Delta p)_{inso}$	DPINSO	Perda de carga associada ao insonorizador	N/m^2
$(\Delta p)_{vent}$	DPVENT	Diferença de pressão provoca- da pelos ventiladores	N/m^2
$(\Delta p)_w$		Diferença de pressão na zona de esteira	N/m^2
QVF	QVF	Vazão de projeto que passa pelos ventiladores de exaus- tão	m^3/seg
QVF_d	QVFD	Vazão de projeto, devido so- mente a ventilação forçada, do início do túnel até a saí- da de exaustão	m^3/seg
QVF_e	QVFE	Vazão de projeto, devido so- mente a ventilação forçada, do fim do túnel até a saída de exaustão	m^3/seg
R	R	Constante do ar	$mKfg/Kgm\ K$
Re_v	REV	Número de Reynolds na zona de transferência, relativo a parede do trem	
Re_{vv}	REVV	Número de Reynolds relativo ao veículo	
Re_w	REW	Número de Reynolds na zona de transferência, relativo a parede do túnel	
RRPO	RRPO	Rugosidade relativa na zona	

SÍMBOLOS		DESCRIÇÃO	UNIDADES
No texto	No programa		
		de transferência	
RRTR	RRTR	Rugosidade relativa na saída de exaustão e poço de alívio	
t	T	Coordenada do tempo	seg
t_{IeR}	TIER	Instante de tempo em que ocorre a intersecção da característica C^+ com a frente do trem	seg
t_{Ies}	TIES	Instante de tempo em que ocorre a intersecção da característica C^- com a frente do trem	seg
t_{IwR}	TIWR	Instante de tempo em que ocorre a intersecção da característica C^+ com a traseira do trem	seg
t_{Iws}	TIWS	Instante de tempo em que ocorre a intersecção da característica C^- com a traseira do trem	seg
T_m	TEMPM	Temperatura média do ar no túnel	K
t_p		Instante de tempo associado a análise de um ponto genérico, P da malha	seg
Δt	DT	Passo no tempo	seg
$(\Delta t)_{trR}$	DTTRR	Intervalo de tempo em que a linha característica C^+ atravessa a zona de transferência em um elemento da malha	seg
$(\Delta t)_{trS}$	DTTRS	Intervalo de tempo em que a linha característica C^- atravessa a zona de transferência em um elemento da malha	seg
V		Velocidade do ar na região "distante" do veículo	m/seg
V_b		Velocidade do ar na secção <u>b</u> da fig. 1	m/seg
V_D	VD	Velocidade do ar na característica C^- , na região "distante" do veículo	m/seg
V_E	VE	Velocidade do ar na característica C^+ , na região "distante" do	

SÍMBOLOS		DESCRIÇÃO	UNIDADES
No texto	No programa		
		veículo	m/seg
V_{g1}, V_{g2}		Velocidades do ar na secção <u>g</u> da fig. 1, relativas aos trechos 1 e 2 do túnel	m/seg
V_{h2}, V_{h3}		Velocidades do ar na secção <u>h</u> da fig. 1, relativas aos trechos 2 e 3 do túnel	m/seg
V_i		Velocidade do ar na secção <u>i</u> da fig. 1	m/seg
V_p		Velocidade do ar para um ponto genérico da malha	m/seg
V_{p1}	$V1(I,J)$	Velocidade do ar para um ponto da malha situado no trecho 1	m/seg
V_{p2}	$V2(I,J)$	Velocidade do ar para um ponto da malha situado no trecho 2	m/seg
V_{p3}	$V3(I,J)$	Velocidade do ar para um ponto da malha situado no trecho 3	m/seg
V_R	VR	Velocidade do ar na característica C^+	m/seg
V_{Rtr}	$VRTR$	Velocidade do ar na característica C^+ , na zona de transferência	m/seg
V_S	VS	Velocidade do ar na característica C^-	m/seg
V_{Str}	$VSTR$	Velocidade do ar na característica C^- , na zona de transferência	m/seg
V_{tr}	VTR	Velocidade do ar na zona de transferência	m/seg
V_v	$VV(I)$	Velocidade do veículo	m/seg
V_4	$V4(I)$	Velocidade do ar na saída de exaustão	m/seg
V_5	$V5(I)$	Velocidade do ar no poço de alívio	m/seg
x	X	Coordenada da distância ao longo do túnel	m

SÍMBOLOS		DESCRIÇÃO	UNIDADES
No texto	No programa		
x_C^+		Coordenada da característica C^+	m
x_C^-		Coordenada da característica C^-	m
x_d, x_e		Coordenadas das secções <u>d</u> e <u>e</u> na fig. 1	m
x_{IeR}	XIER	Posição em que ocorre a intersecção da característica C^+ com a frente do trem	m
x_{IeS}	XIES	Posição em que ocorre a intersecção da característica C^- com a frente do trem	m
x_{IW_R}	XIWR	Posição em que ocorre a intersecção da característica C^+ com a traseira do trem	m
x_{IWS}	XIWS	Posição em que ocorre a intersecção da característica C^- com a traseira do trem	m
x_P		Posição de um ponto genérico da malha	m
x_R	XR	Posição do ponto R (fig. 2)	m
x_S	XS	Posição do ponto S (fig. 2)	m
x_{Ve}	XVE(I)	Posição da frente do trem	m
x_{Vw}	XVELV	Posição da traseira do trem	m
Δx	DX	Incremento ao longo do túnel	m
y	Y	Coefficiente multiplicativo da fórmula de perda de carga por contração do fluxo na frente, ou traseira, do veículo	
z	Z	Expoente da fórmula de perda de carga por contração do fluxo na frente, ou traseira do veículo	

SÍMBOLOS GREGOS

α		Coefficiente relacionado à perda de carga na entrada do túnel
β	BETA	Razão de bloqueio do túnel

SÍMBOLOS GREGOS		DESCRIÇÃO	UNIDADES
No texto	no programa		
λ		Multiplicador relacionado ao <u>mé</u> todo das características	
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$		Multiplicadores de Lagrange	
ν		Viscosidade cinemática do ar	m^2/seg
ξ_{eR}	AKSIER	Indicador do cruzamento da ca- racterística C^+ com a frente do veículo	
ξ_{eS}	AKSIES	Indicador do cruzamento da ca- racterística C^- com a frente do veículo	
ξ_{wR}	AKSIWR	Indicador do cruzamento da ca- racterística C^+ com a traseira do veículo	
ξ_{wS}	AKSIWS	Indicador do cruzamento da ca- racterística C^- com a traseira do veículo	
ρ	RO	Densidade do ar	kg/m^3
τ_t		Tensão de cisalhamento na pare- de do túnel, na região "distan- te" do veículo	N/m^2
τ_v		Tensão de cisalhamento na pare- de do trem, na zona de transfe- rência	N/m^2
τ_w		Tensão de cisalhamento na pare- de do túnel, na zona de transfe- rência	N/m^2

S U M Á R I O

Este trabalho visa, primordialmente, fornecer uma ferramenta operacional para a análise do arrasto aerodinâmico e do sistema de ventilação em túneis de metrô, tipo couraça. Para isto, necessitou-se combinar o efeito de pistão com a ventilação forçada, utilizando a curva real de velocidades do trem, a curva característica dos ventiladores, e uma simulação dos efeitos da saída de exaustão e poço de alívio.

A velocidade e pressão do ar, nesta abordagem, são funções do tempo e da distância ao longo do túnel, obtidas para um intervalo de tempo, que pode compreender a passagem de vários trens consecutivos com o mesmo espaçamento entre si.

Como ferramenta básica, empregou-se o método das características, juntamente com correlações numéricas, para as perdas de carga na região próxima ao trem, contando-se para isto com relações e dados experimentais de trabalhos correlatos.

O estudo em questão pode constituir-se na base de um caminho para otimização de tópicos, tais como: dimensionamento, faixa de operação estável e controle dos ventiladores de exaustão, principalmente em situações de falha ou emergência; configuração geométrica e posicionamento da saída de exaustão e poço de alívio; abertura e fechamento do poço de alívio; performance aerodinâmico do trem; etc.

O programa numérico, para computador digital, é montado de forma a cobrir uma ampla faixa operacional, além de possibilitar um posterior acoplamento com sistemas de ventilação, em estações e túneis de dupla via.

Para efeito de ilustração, o programa é aplicado em um dos trechos em couraça da linha Norte-Sul, do Metrô de São Paulo.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

O primeiro problema, que surge na análise do sistema de ventilação de Metrô, refere-se às temperaturas apropriadas, principalmente para as pessoas nas estações e trens, mas também, para os trabalhadores nos túneis e para o equipamento em geral. Com respeito aos passageiros, os fisiologistas tendem a afirmar que para o ser humano médio, uma temperatura ambiente de verão, variando de 24°C a 27°C , é aceitável ; mas, que diferentes critérios, podem se aplicar a uma mesma situação.

Um fato significativo, para se determinar a temperatura nas estações, é o intervalo de tempo que o corpo humano leva para atingir o equilíbrio térmico, ou seja, uma condição permanente de conforto ou desconforto. Para o indivíduo médio, este tempo é cerca de seis minutos. Logo, a faixa anteriormente citada seria a mais desejável, mas o curto tempo de exposição nas plataformas, muda sensivelmente, a situação. Nas horas de pico, o indivíduo, provavelmente, não gastaria mais que três ou quatro minutos na estação; tempo insuficiente para que seu corpo atinja equilíbrio térmico antes de entrar no trem. Neste último, a temperatura deve ser adequada para o intervalo de tempo médio, correspondente ao percurso médio dos passageiros.

As temperaturas nos segmentos de túnel devem produzir um ambiente satisfatório para os trabalhadores, estando, também, dentro de limites aceitáveis, a fim de assegurar uma vida razoável para os equipamentos. Devido às condições operantes nas estações e túneis, os custos de capital e de manutenção do equipamento mecânico e elétrico têm sido bastante elevados. Os problemas são causados por temperaturas excessivas, alta concentração de partículas poluentes carregadas eletrostaticamente, e por umidade elevada. Até uma certa extensão, estes problemas podem ser aliviados, providenciando-se um meio ambiente melhor, que reduziria os extremos de temperatura, abaixaria o grau de umidade, e removeria a maior parte dos poluentes, prolongando a vida dos equipamentos e reduzindo a faixa de condições operacionais a que eles estão sujeitos.

A questão seguinte relaciona-se com a geração de calor.

Preponderadamente, o calor provém da operação dos trens. Pessoas, motores de escadas rolantes, lâmpadas, ventiladores, máquinas automáticas para vendas, adicionam o seu quinhão, mas, no fim, entre 85 a 90 por cento do calor total é gerado pelos trens. Além disso, cerca da metade deste calor é devido à frenagem, sendo o restante ocasionado pela aceleração, tração, e eventuais aparatos de condicionamento de ar do veículo. Este fato, somente aumenta o problema dos novos Metrô's, nos quais os trens tendem a operar a velocidades mais elevadas. Eles irão requerer maiores potências de tração e maiores cargas de frenagem, aumentando a carga térmica.

Sem medidas de controle do meio, exceto o uso de aberturas para ventilação, uma parte do calor, gerado pelos trens, pode se dirigir a dois locais: em direção ao solo circundante - o sorvedouro de calor - ou para cima, através das aberturas, com o ar deslocado pelo efeito de pistão dos trens. O calor residual elevará a temperatura do ar ambiente.

A quantidade de calor, que pode ser absorvido pelo solo, depende fundamentalmente da diferença de temperaturas entre ele e o ar circunvizinho.

Basicamente, o movimento do trem é análogo ao deslocamento de um pistão ao longo de um cilindro, o túnel; na sua frente, o trem empurra o ar previamente aquecido pelos trens anteriores. Quando o trem se aproxima de uma abertura para ventilação, as pressões que ele gera forçam uma parte do ar quente a sair. Conforme o trem passa pela abertura, as pressões negativas na esteira do trem succionam o ar para dentro do túnel. Por conseguinte, o ar quente interno é trocado pelo ar frio externo. Na determinação da quantidade de ar exaurida e na parcela de calor, que é efetivamente carregada, inúmeras variáveis básicas interferem, tais como: velocidade e dimensões do trem, seção transversal do túnel, comprimento dos túneis entre as estações, dimensões das saídas de ventilação, resistência por atrito nas paredes do trem e do túnel, e vários outros.

Baseando-se em estudos de simulação e medidas experimentais, vários pesquisadores constataram que, na maior parte dos sistemas de trânsito rápido, a combinação, do resfriamento pelo sorvedouro de calor com o efeito de pistão, não é suficiente para manter o ambiente a níveis desejáveis. Introduz-se, portanto, a necessidade do uso da ventilação forçada.

Para uma discussão mais detalhada sobre critérios, análise e controle do meio em túneis de Metrô, vide referências [22] e [23].

1.2 O Problema da Tese

Os modelos de simulação para o sistema de ventilação de Metrôs diferem substancialmente entre si, conforme o objetivo específico almejado. Isto será ilustrado durante a discussão concernente à resenha literária.

A preocupação básica, na criação do modelo elaborado neste trabalho, que refere-se tão somente aos trechos de túnel em cou-raça, é obter uma ferramenta operacional que possa ser aplicada, diretamente, às diversas condições encontradas na prática, sem perder precisão e, conseguindo o maior número possível de informações para efeitos de análise e controle do sistema.

Para se conseguir tal flexibilidade são adotados como parâmetros básicos: as propriedades do fluido; as características geométricas e cinemáticas do trem; as características geométricas do túnel, da saída da exaustão e do poço de alívio; as perdas de carga na saída de exaustão e poço de alívio; dados experimentais sobre as perdas de carga na região próxima ao trem; os diversos coeficientes de atrito junto às paredes; a curva característica dos ventiladores; as vazões de regime devido à ventilação forçada, e o intervalo de tempo entre a passagem de dois trens consecutivos.

Divide-se o campo do escoamento em duas regiões: uma "próxima" ao trem e a outra "distante", cada uma com hipóteses peculiares. Aplicando as equações do movimento e da continuidade na região "distante do trem e na região compreendida entre o trem e o túnel, obtém-se as equações características, que são integradas numericamente. Nas partes anterior e posterior do trem, onde ocorrem perdas localizadas e variações na área do escoamento, são utilizadas relações experimentais; como estas partes constituem as fontes de propagação das ondas de pressão ao longo do túnel, o seu tratamento é um fator primordial na precisão do método.

Da distribuição resultante de pressões e velocidades, como funções do tempo e da distância, obtém-se os dados relevantes sobre o escoamento e o arrasto aerodinâmico.

1.3 Resenha Literária

A resenha está dividida em duas secções. A primeira é concernente ao movimento de trens a baixas velocidades, enquanto a segunda lida com movimentos a altas velocidades.

1.3.a Estudos assumindo fluido incompressível - Baixas velocidades

Até a década de trinta, os sistemas de trânsito rápido eram projetados sem levar em conta a ventilação, resultando, ocasionalmente, temperaturas elevadas e necessitando-se mudanças construtivas, bastante custosas para aliviar o desconforto dos passageiros. Ao mesmo tempo, em algumas estações, os passageiros sentiam-se desconfortáveis devido às altas velocidades do ar sobre as plataformas.

O Metrô de Chicago parece ter sido o primeiro a ser analisado racionalmente, antes da construção, quanto à ação do efeito de pistão e à carga térmica a ser dissipada. Esta análise foi realizada por Brock [4], que desenvolveu equações para o efeito de pistão baseados na hipótese de regime permanente e considerando a capacidade de armazenagem do solo na dissipação da carga térmica. O maior mérito, deste estudo pioneiro, foi o reconhecimento de inúmeras variáveis básicas que regem o fenômeno.

Brown [7] elaborou um método para o caso simples de um túnel em couraça sem aberturas, onde o efeito de pistão foi equacionado, considerando-se dois sistemas de referência: um fixado ao túnel e o outro movendo-se com o trem. A equação diferencial ordinária resultante possui solução fechada, fornecendo a velocidade (uniforme) do ar no túnel em função do tempo. O modelo foi extrapolado para túneis de leito duplo (trincheira), simplesmente aumentando o perímetro molhado para levar em conta o efeito da parede central perfurada. A inclusão de aberturas no túnel envolveria a resolução de um sistema de equações diferenciais não lineares, com coeficientes variáveis. O tratamento da parte térmica utiliza um balanço de energia onde assume-se geração e dissipação de calor uniforme ao longo do túnel. Obtém-se como resultado a temperatura (uniforme) do ar no túnel em função do tempo. As informações quantitativas, oriundas da aplicação do método, apesar de serem úteis como estimativas para projeto, possuem um valor restrito para efeitos de análise e controle.

Em seus primeiros trabalhos, Gouse e equipe [5] realizaram experiências de queda livre com modelos esféricos e cilíndricos, através de tubos com parede sólida e perfurada e alturas de 4 e 8 pés. Alguns testes foram realizados com as extremidades do tubo abertas e outros com uma extremidade fechada, para simular uma razão comprimento-diâmetro infinito. Diferentes meios fluidos foram utilizados para permitir variações no número de Reynolds do veículo. Os resultados mostraram que, para razões comprimento-diâmetro do veículo acima de 15 e razões diâmetro do veículo-diâmetro do túnel menores que 0,67, o coeficiente de arrasto, baseado na área lateral do veículo, é independente da razão comprimento-diâmetro do veículo para escoamento incompressível. A porosidade, nas paredes do tubo, diminuiu, consideravelmente, as forças de arrasto aerodinâmico.

Posteriormente, Gouse e Wali apresentaram um trabalho [6] com os resultados de uma investigação sobre as forças de arrasto exercidas em veículos, tendo a forma de um cilindro com nariz aerodinâmico e base cônica, movendo-se, coaxialmente, com velocidade uniforme em tubos de parede sólida e comprimento finito, em função do quociente entre a velocidade relativa do fluido na frente do veículo e, a velocidade absoluta do veículo. Uma análise teórica foi desenvolvida, dividindo-se o escoamento do fluido em duas regiões: escoamento "próximo" e "distante". Estas regiões foram unidas pela condição que as pressões são contínuas nas fronteiras. Elaboraram-se também investigações experimentais, utilizando um tubo de teste de acrílico, vertical, com 25 pés de altura e 1,732 polegadas de diâmetro interno. O tubo foi suprido com escoamento de água a diferentes gradientes de pressão, positivos e negativos. Testes de queda livre com o veículo foram então conduzidos, empregando diferentes tamanhos do modelo e várias velocidades terminais, obtidas através da variação de seus pesos. Com o auxílio da análise teórica, estabeleceu-se um coeficiente semi-empírico para as perdas na frente do veículo. Para validar a análise teórica, uma comparação foi feita entre o coeficiente de arrasto calculado, utilizando as perdas semi-empíricas, e o obtido através de um conjunto de experiências. A comparação, em geral, foi bastante favorável. Uma limitação do trabalho é que os coeficientes experimentais foram obtidos e testados somente para número de Reynolds do veículo em torno de 10^5 .

Um outro programa experimental foi desenvolvido por Dayman e Kurtz [8], mais recentemente, para estudar as características

aerodinâmicas de um trem urbano, movendo-se através de um túnel. Esta abordagem procurou ampliar o número de variáveis e a faixa de número de Reynolds do veículo a serem analisados, em relação a trabalhos anteriores. Apesar, disto, os resultados ainda possuem um valor operacional restrito para cobrirem toda a gama de situações reais. A maioria dos testes foi conduzido em um tubo vertical pressurizado com 33,5m de comprimento e 5,3 cm de diâmetro. Este tubo aproxima um túnel, sem aberturas, com 3 km de comprimento. Os coeficientes de arrasto do veículo foram determinados a partir do peso e velocidade do modelo, como também a partir da diferença de pressão através do modelo, consoante medido na parede do tubo. Com o auxílio da distribuição de pressões ao longo do tubo, as seguintes informações adicionais foram obtidas: velocidade do escoamento no tubo; coeficiente de atrito no tubo, antes e após o veículo; coeficiente de atrito no veículo e coeficientes de perda de quantidade de movimento nas partes anterior e posterior do veículo. Estas informações foram obtidas a partir de uma variedade de configurações do veículo: rugosidade da parede, formatos do nariz e da base, razão diâmetro do veículo - diâmetro do túnel, comprimento, porosidade e posição lateral dentro do tubo.

O Instituto de Transporte Rápido do Departamento de Transporte dos E.U.A. contratou uma associação de consultoria formada por Parson, Brinckerhoff, Quade & Douglas, Inc., De Lenw, Cather & Company e Kaiser Engineers para elaborarem, como produto final de um programa de pesquisas, um manual sobre critérios, análise e controle do meio em Metrô. A discussão e as conclusões sobre critérios encontra-se na ref. [27]. A análise do sistema envolveu a montagem de modelos de simulação para a performance do trem e para o meio, sob o ponto de vista aerodinâmico e termodinâmico, sob diversas condições de controle. Os resultados de diversas fases deste estudo são apresentados nas refs. [9], [10] [11], [13] e [22].

Algumas pesquisas básicas associadas a este projeto foram conduzidas no Instituto de Tecnologia da Califórnia. Uma delas, versando sobre a geração e propagação de ondas nos túneis de Metrô é apresentada na ref. [16].

A Divisão de Tecnologia Aeroespacial da Developmental Sciences Inc. elaborou um modelo completo em escala reduzida de um sistema metroviário com túneis de leito simples e duplo, aberturas para ventilação e estações, desenvolvendo dados que incluem a distribuição do fluxo de ar na junção das aberturas com o túnel,

para diversas configurações, e padrões de circulação do ar nas estações. As referências [14] e [15] abordam estes estudos.

No que tange à simulação aerodinâmica, o modelo mencionado acima propicia uma avaliação, aparentemente razoável, para o sistema como um todo mas, é bastante deficiente na análise das particularidades do escoamento em cada componente do conjunto.

I.3.b Estudos assumindo fluido compressível - Altas velocidades

Os sistemas de transporte, que requerem veículos movendo-se dentro de túneis, podem ser classificados de diferentes maneiras conforme o arranjo propulsão - suspensão utilizado. Os Metrô modernos caracterizam-se por percursos a baixas velocidades através dos túneis, enquanto veículos auto propelentes e magneticamente levitados, operando em meios de pressão reduzida à velocidades além de 225m/seg, podem representar um sistema de transportes para o futuro, interligando cidades e regiões.

Strom [17] desenvolvem um método analítico para a determinação do arrasto aerodinâmico e demanda de potência para um veículo, operando em um túnel a altas velocidades. O procedimento consistiu na subdivisão do escoamento em duas regiões separadas: o campo "distante", não permanente e o campo "próximo" quase permanente. Cada campo foi calculado separadamente, relacionando-se as condições de escoamento nas fronteiras comuns através de um processo iterativo. Na região distante aplicou-se as equações da continuidade, quantidade de movimento, energia e do estado na forma divergente para se capturar a onda de choque produzida no túnel, à frente do veículo. A aplicação das mesmas equações na região "próxima" produz um sistema de equações diferenciais ordinárias não lineares, que não pôde ser integrada através dos algoritmos usuais, sob condições de choque, devido a existência de singularidade. As soluções de cada campo foram obtidas através de várias hipóteses simplificadoras, coeficientes experimentais para as perdas de quantidade de movimento, e algoritmos especiais de integração. No acoplamento foi usado o método das características. Foram expostos resultados para operações a altas velocidades em túneis longos sob diversas geometrias veículo-túnel e, também, resultados a baixas velocidades, que compararam favoravelmente com experimentos e outros dados teóricos. Baseado nos resultados, apresentou-se uma

descrição física do fenômeno ondulatório que ocorre no túnel.

O efeito de diferentes sistemas de propulsão na aerodinâmica de um veículo entrando ou passando por um túnel é descrito por Hammit na ref. [18]. Neste trabalho levam-se em conta os efeitos do comprimento do veículo, configuração da entrada do túnel e aberturas de ventilação no arrasto do veículo e no campo de escoamento do túnel. Além disso, determina-se as condições sob as quais as ondas geradas pelo veículo podem escapar do túnel e causar um estampido.

A possibilidade de projetar um túnel ferroviário, que minimize os transientes na pressão do ar, gerados durante a entrada de um trem a alta velocidade, foi investigada por Fox e Vardy [20], que deram uma ênfase particular na redução da magnitude e taxa de crescimento da onda de pressão, resultante da primeira aceleração do ar, a partir do repouso. Utilizou-se as equações do movimento para fluxo compressível, unidimensional e não permanente, na forma característica. Encontrou-se que, tanto a magnitude como a taxa de crescimento da onda primária podem ser reduzidas através de portais convergentes no túnel; a quantidade de redução depende do comprimento e formato do portal e, da velocidade do trem. Investigou-se, também, o grau de proteção que poderia ser dado a um trem já dentro de um túnel de leito duplo, quando um segundo trem estivesse entrando.

Segundo um estudo elaborado por Foa [19], a potência requerida para a propulsão de um veículo movendo-se em túneis depende, não somente da densidade do meio, as formas e velocidade do veículo, a razão diâmetro do veículo-diâmetro do túnel, o arrasto e o comprimento do tubo, mas, também, da maneira como o empuxo é gerado, da eficiência de conversão de energia do mecanismo propulsor e da amplitude das perturbações, que são induzidas no campo "distante" pelo próprio veículo e pelo seu empuxo. Mudanças no modo de geração do empuxo e as modificações decorrentes no campo "próximo" foram analisadas para situações específicas de especial interesse. A análise revelou que tais modificações podem ser utilizadas para produzir reduções substanciais na demanda de potência para propulsão.

Gaillard elaborou um estudo [21] sobre o arrasto aerodinâmico em trens e, as variações de pressão nas janelas dos vagões, quando dois trens se cruzam em túneis longos.

Foram relatadas as fórmulas para o arrasto, tanto permanente como transiente, típicas para um trem expresso Suíço, assim como, coeficientes para as amplitudes de pressão durante a passagem de dois trens. Todos estes coeficientes foram medidos através de testes, com modelos e "in loco", sendo boa, a concordância entre os dois conjuntos de resultados.

2. FORMULAÇÃO TEÓRICA

2.1 Escolha do modelo físico

Uma vez definidos os objetivos a serem alcançados, a questão reside em elaborar um modelo físico para o problema, que esteja o mais próximo possível da realidade, atendendo a estas condições de contorno.

A ventilação de túneis em couraça pode ser natural, apenas impulsionada pelo movimento de arrasto provocado pelos trens, havendo aberturas para que haja troca com o ar exterior. Este sistema, apesar de ter sido utilizado em alguns casos, principalmente nas primeiras fases da operação (vide estudo sobre o Metrô da cidade do México - ref. [24], é muito dependente de condições climáticas e de tráfego favoráveis, além de impossibilitar um controle efetivo do processo.

Para a ventilação forçada de túneis podemos distinguir:

- Ventilação transversal, muito mais indicada para transportes onde haja produção de gases de combustão;
- Ventilação longitudinal, onde a massa de ar entra numa determinada seção do túnel e vai varrendo o túnel até a saída (mas sempre com aumento da concentração de contaminantes);

Este último tipo é o mais adequado para Metrôs, onde os contaminantes se encontram em concentrações pequenas e não trazem o menor perigo para os ocupantes do túnel. A ventilação longitudinal também envolve menores custos de construção civil.

Dentre as várias possibilidades para a ventilação longitudinal no túnel escolhemos, como base para o modelo, um sistema com ventiladores de insuflamento nas estações e ventiladores de exaustão no centro do túnel. A não colocação de ventiladores de insuflamento exigiria velocidades do ar muito elevadas nos túneis, para se manter o nível térmico desejado. O posicionamento dos ventiladores de exaustão possui a desvantagem de produzir o fluxo do calor de frenagem, liberado próximo das estações, para o interior do túnel. Apresenta, no entanto, a vantagem fundamental, em caso de incêndio no túnel, de evitar que a fumaça atinja as estações e, permita que, a partir desta, seja dado o combate ao fogo.

No fim dos túneis, ou na cabeceira das estações, adotaremos poços de alívio nos quais haverá uma válvula que abrir-se-á quando a frente do trem atingir o duto de exaustão e, fechar-se-á, assim que a traseira do trem entre na estação. Terá apenas duas posições: completamente aberta, ou fechada. A função básica destes poços é eliminar grande parte da onda de pressão gerada pelo efeito de pistão.

Este esquema geral propicia excelentes condições operacionais e de controle, além de um custo relativamente reduzido. A sua aplicação nos Metrô de Caracas e São Paulo é relatada nas refs. [25], [28] e [29].

Na fig. 1 apresentamos um esboço deste modelo físico. O duto de exaustão e o poço de alívio foram concentrados, de maneira a serem analisados somente os valores globais do escoamento através deles. Isto permitiu uma economia substancial no tempo de computador, envolvido na resolução do modelo, sem alterar, apreciavelmente, a precisão e os objetivos do método.

2.2 Elaboração do modelo matemático

Baseando-se no modelo físico escolhido, elaborar-se-á uma formulação matemática, plausível de solução, que represente, com fidelidade, os fenômenos que ocorrem no sistema.

Conforme mencionado anteriormente, os efeitos de compressibilidade do ar são perfeitamente desprezíveis nos estudos sobre ventilação e arrasto aerodinâmico em Sistemas de Trânsito Rápido Urbanos. Para uma discussão a este respeito vide refs. [6] e [18]

2.2.a Campo de velocidades e pressões

(i) Equações Básicas

Assumiremos a condição de fluxo incompressível e unidimensional. Isto significa que as velocidades utilizadas, correspondem a valores médios em suas respectivas seções transversais ao escoamento.

O campo do escoamento será dividido em duas regiões conforme indicado na fig. 1. A razão para isto baseia-se no

argumento de que, o campo na região "próxima" ao veículo pode ser tratado como permanente quando relacionado às coordenadas do veículo. A justificativa para esta hipótese reside no fato de que o tempo requerido, para que o escoamento na região "próxima" se ajuste ao regime permanente, na presença de perturbações, ou mudanças na força propulsiva, é muito menor que, o tempo de ajuste do campo "distante" do veículo. A região "próxima" será subdividida nas zonas de entrada, transferência e esteira, por ter cada uma delas características peculiares quanto ao escoamento.

- Região "distante" do veículo

A metodologia a ser utilizada na formulação das equações segue um padrão usual da análise de transientes hidráulicos (vide ref. [3]).

Para um volume de controle englobando duas seções transversais do túnel, próximas entre si, o balanço de massa fica:

$$\rho \frac{\pi D t^2}{4} V - \left[\rho \frac{\pi D t^2}{4} V + \frac{\pi D t^2}{4} \frac{\partial}{\partial x} (\rho V) \delta x \right] = \frac{\pi D t^2}{4} \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \quad (2.1)$$

Dividindo pela massa $\rho \frac{\pi D t^2}{4} \delta x$, e rearranjando:

$$\frac{V}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

O módulo de elasticidade do fluido pode ser expresso como:

$$K = \frac{\frac{dp}{dt}}{\frac{dp}{dt} \cdot \frac{1}{\rho}} \quad (2.3)$$

Definindo a velocidade do som no meio fluido como $a = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$, temos

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = \frac{1}{\rho} \left(V \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) = \frac{\frac{dp}{dt}}{K} = \frac{\frac{dp}{dt}}{a^2 \rho} = \frac{V \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t}}{a^2 \rho} \quad (2.4)$$

Portanto, a equação da continuidade fica:

$$\frac{1}{a^2 \rho} \left[V \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \right] + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{ou} \quad \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (2.5)$$

Um equilíbrio de forças no mesmo volume de controle resulta em:

$$p \frac{\pi D t^2}{4} - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \delta x \right) \frac{\pi D t^2}{4} + \tau_t \pi D t \delta x = \rho \frac{\pi D t^2}{4} \delta x \frac{dV}{dt} \quad (2.6)$$

Dividindo pela massa e rearranjando:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{4 \tau_t}{\rho D t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (2.7)$$

Assumindo, para a tensão de cisalhamento na parede do túnel, a expressão de regime permanente à mesma velocidade temos:

$$\tau_t = - \frac{\rho f_t V |V|}{8} \quad (2.8)$$

e, a equação do movimento fica:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f_t V |V|}{2 D t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (2.9)$$

As equações da continuidade e do movimento formam um par de equações diferenciais parciais quase lineares do tipo hiperbólico, em termos de duas variáveis dependentes, velocidade e pressão, e duas variáveis independentes, distância ao longo do túnel e tempo. As equações serão convertidas em quatro equações diferenciais ordinárias através do método das características (vide refs. [1] e [2]).

Designando a equação do movimento por L_1 e da continuidade por L_2 podemos combiná-las linearmente utilizando um multiplicador λ , a determinar:

$$L = L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left[\frac{\partial p}{\partial x} \left(V + \frac{1}{\rho \lambda} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} \right] + \left[\frac{\partial V}{\partial x} (V + \rho a^2 \lambda) + \frac{\partial V}{\partial t} \right] + f_t \frac{V|V|}{2Dt} = 0 \quad (2.10)$$

Se $V = V(x, t)$ e $p = p(x, t)$ são soluções de L_1 e L_2 , então:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial p}{\partial t} \quad e$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t}, \text{ ao longo das linhas características}$$

(2.11)

comparando as expressões acima com L observa-se que, se

$$\frac{dx}{dt} = V + \frac{1}{\rho \lambda} = V + \rho a^2 \lambda,$$

L transforma-se na equação diferencial ordinária

$$\lambda \frac{dp}{dt} + \frac{dV}{dt} + f_t \frac{V|V|}{2Dt} = 0 \quad (2.12)$$

Como $\frac{1}{\rho \lambda} = \rho a^2 \lambda$, tem-se $\lambda = \pm \frac{1}{\rho a}$, que são os valores caracteris

ticos.

Substituindo estes valores de λ nas expressões de $\frac{dx}{dt}$ obtêm-se

$\frac{dx}{dt} = V \pm a$, que constituem as linhas características, ao longo das

quais são válidas as equações diferenciais ordinárias, a que o problema se reduziu.

Temos, então, dois pares de equações a serem resolvidos simultaneamente, cada par correspondendo a uma linha característica.

$$C^+ \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + \frac{dV}{dt} + f_t \frac{V |V|}{2Dt} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V + a \end{array} \right. \quad e$$

$$C^- \left\{ \begin{array}{l} - \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + \frac{dV}{dt} + f_t \frac{V |V|}{2Dt} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V - a \end{array} \right. \quad (2.13)$$

- Zona de Transferência

É a região anular compreendida entre as paredes do trem e do túnel.

Assumindo escoamento plenamente desenvolvido, através de um volume de controle englobando duas seções transversais nesta região, próximas entre si, e, aplicando um equilíbrio de forças, obtém-se:

$$\frac{\pi}{4} (Dt^2 - Dv^2) - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \delta x \right) \frac{\pi}{4} (Dt^2 - Dv^2) + \tau_v \pi Dv \delta x + \tau_w \pi Dt \delta x = \frac{\pi}{4} (Dt^2 - Dv^2) \delta x \frac{dV_{tr}}{dt} \quad (2-14)$$

Dividindo pela massa $\frac{\pi}{4} (Dt^2 - Dv^2) \delta x$, e rearranjando:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{4Dv\tau_v}{(Dt^2 - Dv^2)\rho \frac{Dt^2}{Dt^2}} - \frac{4Dt\tau_w}{(Dt^2 - Dv^2)\rho \frac{Dt}{Dt}} + V_{tr} \frac{\partial V_{tr}}{\partial x} + \frac{\partial V_{tr}}{\partial t} = 0 \quad (2.15)$$

Adotando

Tensão de cisalhamento na parede do trem:

$$\tau_v = - \rho \frac{f_v (V_{tr} - V_v) |V_{tr} - V_v|}{8} \quad (2.16)$$

Tensão de cisalhamento na parede do túnel:

$$\tau_w = -\rho \frac{f_w V_{tr} |V_{tr}|}{8} \quad (2.17)$$

Razão de Bloqueio: $\beta = \frac{Dv}{Dt} \quad (2.18)$

a equação do movimento fica:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\beta f_v (V_{tr} - V_v) |V_{tr} - V_v|}{2Dt(1-\beta^2)} + \frac{f_w V_{tr} |V_{tr}|}{2Dt(1-\beta^2)} + \frac{V_{tr} \partial V_{tr}}{\partial x} + \frac{\partial V_{tr}}{\partial t} = 0 \quad (2.19)$$

Aplicando o método das características para as equações do movimento e da continuidade, que é a mesma deduzida anteriormente, obtém-se o seguinte conjunto de equações características:

$$\begin{aligned} C^+ & \left\{ \begin{aligned} \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + \frac{dV_{tr}}{dt} + \frac{\beta f_v (V_{tr} - V_v) |V_{tr} - V_v|}{2Dt(1-\beta^2)} + \frac{f_w V_{tr} |V_{tr}|}{2Dt(1-\beta^2)} &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= V_{tr} + a \end{aligned} \right. \\ C^- & \left\{ \begin{aligned} -\frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + \frac{dV_{tr}}{dt} + \frac{\beta f_v (V_{tr} - V_v) |V_{tr} - V_v|}{2Dt(1-\beta^2)} + \frac{f_w V_{tr} |V_{tr}|}{2Dt(1-\beta^2)} &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= V_{tr} - a \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (2.20)$$

- Zona de Entrada

Nesta zona, é evidente que, a componente de velocidade axial é uma função rapidamente crescente de x . Desde que as forças de inércia, nas equações do movimento, são proporcionais ao quadrado da velocidade enquanto as forças viscosas são apenas proporcionais à primeira potência, a ação destas últimas pode ser desprezada.

As perdas de carga são oriundas da combinação de mudanças na seção transversal do escoamento, separação da camada limite, junto às paredes, e as elevadas acelerações decorrentes. Os efeitos resultantes da mudança na seção transversal do fluxo são altamente localizadas, enquanto as perturbações devido ao descolamento da camada limite podem se estender por distâncias consideráveis. A predição destas perdas só é possível através de investigações experimentais, guiadas por um bom entendimento físico do fenômeno.

Conforme mencionado anteriormente, o escoamento nesta região será considerado como quase permanente para cada instante de tempo considerado, em relação a um referencial unido ao veículo.

Designando por V e V_{tr} as velocidades médias nas seções f e e da fig. 1 e, aplicando a equação da continuidade entre estas seções, obtém-se:

$$(V - V_V) \pi \frac{D_t^2}{4} = (V_{tr} - V_V) \pi \frac{(D_t^2 - D_V^2)}{4}, \text{ ou seja}$$

$$(V - V_V) = (1 - \beta^2) (V_{tr} - V_V)$$

Com vistas à aplicação da equação de Bernoulli, serão considerados os seguintes casos:

- (a) $(V - V_V) < 0$ e $(V_{tr} - V_V) < 0$ - o ar escoa contrário ao sentido do trem, em relação ao ref. móvel, sofrendo uma contração na frente deste; é a situação que ocorre devido somente ao efeito de pistão.

$$\text{Logo: } p_f + \frac{1}{2} \rho (V - V_V)^2 = p_e + \frac{1}{2} \rho (V_{tr} - V_V)^2 + \underbrace{\rho H L e_c}_{\text{perdas na contração}} \quad (2.21)$$

$$\therefore p_f - p_e = (\Delta p)_e = \frac{1}{2} \rho \left[(V_{tr} - V_V)^2 - (V - V_V)^2 \right] + \rho H L e_c \quad (2.22)$$

Definindo $H_{Le_c} = \frac{1}{2} K_{e_c} \left[(V - V_v) - (V_{tr} - V_v) \right]^2$ e substituindo, juntamente com a equação da continuidade, na expressão de $(\Delta p)_e$, obtém-se:

$$(\Delta p)_e = \rho/2 \left[(1 - (1 - \beta^2)^2) + K_{e_c} \beta^4 \right] (V_{tr} - V_v)^2 \quad (2.23)$$

(b) $(V - V_v) > 0$ e $(V_{tr} - V_v) > 0$ - o ar escoia no mesmo sentido do trem, em relação ao ref. móvel, sofrendo uma expansão na frente deste; é uma situação que pode ocorrer devido à ventilação forçada.

$$\text{Logo: } p_f + \frac{1}{2} \rho (V - V_v)^2 + \underbrace{\rho H_{Le_e}}_{\text{perdas na expansão}} = p_e + \frac{1}{2} \rho (V_{tr} - V_v)^2 \quad (2.24)$$

Definindo $H_{Le_e} = \frac{1}{2} K_{e_e} \left[(V - V_v) - (V_{tr} - V_v) \right]^2$, utilizando a equação da continuidade e rearranjando a expressão acima, obtém-se:

$$(\Delta p)_e = \rho/2 \left[(1 - (1 - \beta^2)^2) - K_{e_e} \beta^4 \right] (V_{tr} - V_v)^2 \quad (2.25)$$

Generalizando:

$$(\Delta p)_e = \rho/2 \left[(1 - (1 - \beta^2)^2) + K_e \beta^4 \right] (V_{tr} - V_v)^2 \quad (2.26)$$

Pode-se escrever, alternativamente:

$$(\Delta p)_e = C_e \underbrace{\rho/2 \left[1 - (1 - \beta^2)^2 \right]}_{(p_f - p_e) \text{ sem perdas}} (V_{tr} - V_v)^2 \quad (2.27)$$

$$\text{onde } C_e = 1 + K_e \frac{\beta^2}{(2 - \beta^2)} \quad (2.28)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Se } (V-V_V) < 0 \text{ e } (V_{tr}-V_V) < 0: K_e = K_{e_c} \text{ e } C_e = C_{e_c} & \text{(contração do fluxo)} \\ \text{Se } (V-V_V) > 0 \text{ e } (V_{tr}-V_V) > 0: K_e = K_{e_e} \text{ e } C_e = C_{e_e} & \text{(expansão do fluxo)} \end{array} \right.$$

Zona de Esteira

Atrás do veículo existe uma zona de esteira onde o fluxo desacelera rapidamente. O jato fluido emerge do ângulo e a esteira decorrente espalha-se, conforme a distância a partir do veículo aumenta e, a diferença entre as velocidades na esteira e na região "Distante", atrás do veículo, torna-se menor. Novamente, a contribuição das forças de cisalhamento é desprezível.

Aplicando a equação da continuidade obtém-se:

$$(V-V_V) = (1-\beta^2) (V_{tr}-V_V)$$

onde V e V_{tr} são as velocidades nas seções c e d da fig. 1, respectivamente.

Através de um procedimento análogo ao utilizado na zona de entrada, são inferidos os seguintes resultados, com respeito a equação de Bernoulli:

Caso (a) $(V-V_V) < 0$ e $(V_{tr}-V_V) < 0$ - o ar sofre uma expansão atrás do trem

$$(\Delta p)_w = p_d - p_c = \rho/2 \left[((1-\beta^2)^2 - 1) + K_{we} \beta^4 \right] (V_{tr}-V_V)^2 \quad (2.29)$$

Caso (b) $(V-V_V) > 0$ e $(V_{tr}-V_V) > 0$ - o ar sofre uma contração atrás do tre

$$(\Delta p)_w = p_d - p_c = \rho/2 \left[((1-\beta^2)^2 - 1) - K_{wc} \beta^4 \right] (V_{tr}-V_V)^2 \quad (2.30)$$

Generalizando:

$$(\Delta p)_w = \rho/2 \left[((1-\beta^2)^2 - 1) + K_w \beta^4 \right] (V_{tr}-V_V)^2 \quad (2.31)$$

Alternativamente, tem-se:

$$(\Delta p)_w = C_w \underbrace{\rho/2 \left[(1-\beta^2)^2 - 1 \right] (V_{tr}-V_v)^2}_{(pd-p_c) \text{ sem perdas}} \quad (2.32)$$

$$\text{onde } C_w = 1 - K_w \frac{\beta^2}{(2-\beta^2)} \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} \text{Se } (V-V_v) < 0 \text{ e } (V_{tr}-V_v) < 0: K_w = K_{we} \text{ e } C_w = C_{we} & \text{(expansão do fluxo)} \\ \text{Se } (V-V_v) > 0 \text{ e } (V_{tr}-V_v) > 0: K_w = -K_{wc} \text{ e } C_w = C_{wc} & \text{(contração do fluxo)} \end{cases}$$

(ii) Condições de Contorno

Para efeitos da análise matemática, o túnel (fig.1) será dividido em cinco trechos:

- Trecho 1: compreendido entre a entrada do túnel (seção a) e a abertura de exaustão (seção g).
- Trecho 2: compreendido entre a saída de exaustão e a abertura de alívio (seção h).
- Trecho 3: compreendido entre o poço de alívio e a saída do túnel (seção i).
- Trecho 4: saída de exaustão.
- Trecho 5: poço de alívio.

Entrada do Túnel:

Como a simulação do padrão de escoamento nas estações é razoavelmente complexa, envolvendo um número grande de dados e verificações, será assumido, para a finalidade deste estudo, pressão atmosférica e velocidade zero.

Aplicando a equação de Bernoulli entre as seções a e b:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= p_b + \rho \frac{V_b^2}{2} + (\Delta p)_{ent} \\ \text{valor manométrico} \\ (\Delta p)_{ent} &= \rho K_{ent} \frac{V_b^2}{2} \end{aligned} \right\} p_b = -\rho \frac{V_b^2}{2} - \rho K_{ent} \frac{V_b^2}{2} = (-K_{ent} - 1) \rho \frac{V_b^2}{2} = \alpha \rho \frac{V_b^2}{2} \quad (2.34)$$

Para tubo simples com ambas as extremidades abertas
 $\alpha = 1,7$ (ref. [8]).

Logo: $p_1 = - 0,85 \rho V_b^2$ (2.35)

Saída de Exaustão:

Aplicando a equação da continuidade nesta seção obtém-se

$$(V_{g1} \frac{\pi D_t^2}{4} - V_{g2} \frac{\pi D_t^2}{4}) e = V_4 A_4, \text{ ou seja } V_4 = e (V_{g1} - V_{g2}) \frac{\pi D_t^2}{4 A_4} \quad (2.36)$$

onde e leva em conta o efeito do escoamento em outros túneis servidos pela mesma saída de exaustão. Obviamente quando a abertura estiver conectada a um só túnel $e=1$.

A pressão é comum aos três trechos:

$$p_{g1} = p_{g2} = p_4 \quad (2.37)$$

O efeito dos ventiladores e das perdas de carga nos dutos de exaustão será abordado posteriormente.

Poço de Alívio

Analogamente tem-se, da equação da continuidade:

$$V_5 = (V_{h2} - V_{h3}) \frac{\pi D_t^2}{4 A_5} \quad (2.38)$$

Pressão comum aos três trechos:

$$p_{h2} = p_{h3} = p_5 \quad (2.39)$$

As perdas de carga nos dutos do poço de alívio serão consideradas posteriormente.

Saída do Túnel

Para $V_i \geq 0$, aplicando a equação de Bernoulli entre as seções i e j , obtém-se:

$$\left. \begin{array}{l} \underbrace{p_i + \rho \frac{V_i^2}{2}}_{\text{valor manométrico}} = (\Delta p)_{\text{saída}} \\ (\Delta p)_{\text{saída}} = \rho \frac{V_i^2}{2} \end{array} \right\} p_i = 0 \quad (2.40)$$

$$\text{Para } V_i < 0: p_i = -0,85 \rho V_i^2 \quad (\text{mesma situação da entrada to túnel}) \quad (2.41)$$

(iii) Condições Iniciais

Como condições iniciais, serão assumidas as distribuições de pressão e velocidade, ao longo do túnel, decorrentes do funcionamento dos ventiladores de exaustão na condição de projeto.

Definindo:

QVF_e = vazão de projeto, devido somente à ventilação forçada, do início do túnel até a saída de exaustão,

QVF_d = vazão de projeto, devido somente à ventilação forçada, do fim do túnel até a saída de exaustão e $(QVF_d < 0)$

QVF = vazão de projeto que passa pelos ventiladores de exaustão
(Obs: Uma mesma saída de exaustão pode servir mais de um túnel),

obtem-se a seguinte distribuição de velocidades:

$$\text{Trecho 1: } V_{p1} = \frac{4QVF_e}{\pi D_t^2}$$

$$\text{Trechos 2 e 3: } V_{p2} = V_{p3} = \frac{4QVF_d}{\pi D_t^2}$$

Trecho 4: $V_4 = \frac{Q_{VF}}{A_4}$

Trecho 5: $V_5 = 0$ (a válvula do poço de alívio só abre quando o trem entra na 2a. metade do túnel).

Distribuição de pressões:

Entrada do túnel: $p_b = - 0,85 \rho V_b^2$

Seção do túnel onde se localiza a saída de exaustão:

$$p_{g1} = p_{g2} = p_4 = \rho/2 \underbrace{f_4 \frac{L_{4eq}}{Dh_4} V_4 |V_4|}_{\text{diferença de pressão ocasionada pelas perdas de carga localizadas e distribuídas ao longo dos dutos de exaustão}} - (\Delta p)_{\text{vent}} \quad (\text{pressão manométrica de sucção})$$

diferença de pressão ocasionada pelas perdas de carga localizadas e distribuídas ao longo dos dutos de exaustão

Saída do Túnel: $p_i = - 0,85 \rho V_i^2$

Para as seções internas dos trechos 1, 2 e 3, a pressão em um ponto qualquer é igual a pressão de sucção na abertura para exaustão, mais a perda de carga distribuída ao longo da distância entre a abertura e o ponto considerado.

2.2.b. Força de Arrasto Aerodinâmico

Os parâmetros, que determinam o arrasto aerodinâmico do trem, estão condicionados à região "próxima" ao veículo, sujeitas, portanto, à hipótese de escoamento quase permanente para cada instante no tempo.

Aplicando um equilíbrio de forças em um volume de controle englobando as seções d e e (zona de transferência) da fig. 1, obtém-se:

$$\int_{\frac{D_v}{2}}^{\frac{D_t}{2}} p_d 2\pi r dr + \int_{x_d}^{x_e} (+\tau_v) \pi D_v dx + \int_{x_d}^{x_e} (+\tau_w) \pi D_t dx - \int_{\frac{D_v}{2}}^{\frac{D_t}{2}} p_e 2\pi r dr = 0 \quad (2.42)$$

ou seja:

$$p_d \frac{\pi}{4} (D_t^2 - D_v^2) + \tau_v \pi D_v L_v + \tau_w \pi D_t L_v - p_e \frac{\pi}{4} (D_t^2 - D_v^2) = 0 \quad (2.43)$$

Dividindo por

$$\frac{\pi}{4} (D_t^2 - D_v^2) \quad \text{e rearranjando:}$$

$$p_e - p_d = \frac{4\beta L_v \tau_v}{D_t(1-\beta^2)} + \frac{4L_v \tau_w}{D_t(1-\beta^2)} \quad (2.44)$$

$$\text{Como } \tau_v = \frac{-\rho f_v (V_{tr} - V_v) |V_{tr} - V_v|}{8} \quad \text{e} \quad \tau_w = \frac{-\rho f_w V_{tr} |V_{tr}|}{8}, \quad (2.45)$$

$$p_e - p_d = \frac{-\rho L_v}{2D_t(1-\beta^2)} \left[\beta f_v (V_{tr} - V_v) |V_{tr} - V_v| + f_w V_{tr} |V_{tr}| \right] \quad (2.46)$$

A equação do movimento aplicada a um volume de controle entre as seções f e e (zona de entrada) resulta em:

$$F_{De} - \int_0^{\frac{D_t}{2}} p_f 2\pi r dr + \int_{\frac{D_v}{2}}^{\frac{D_t}{2}} p_e 2\pi r dr = - \int_0^{\frac{D_t}{2}} \rho (V - V_v) |V - V_v| 2\pi r dr + \int_{\frac{D_v}{2}}^{\frac{D_t}{2}} \rho (V_{tr} - V_v) |V_{tr} - V_v| 2\pi r dr \quad (2.47)$$

onde F_{D_e} = componente da força de arrasto na zona de entrada.

Substituindo a equação da continuidade $(V-V_v) = (1-\beta^2)(V_{tr}-V_v)$

e rearranjando:

$$F_{D_e} = p_e \frac{\pi D_v^2}{4} + \underbrace{(p_f - p_e) \frac{\pi D_t^2}{4} + \rho \frac{\pi D_t^2}{4} \left[-(1-\beta^2)^2 + (1-\beta^2) \right] (V_{tr}-V_v) |V_{tr}-V_v|}_{\text{arrasto de forma } (F_{D_N})} \quad (2.48)$$

como $p_f - p_e = C_e \rho / 2 \left[1 - (1-\beta^2)^2 \right] (V_{tr}-V_v)^2$, a sua substituição na expressão acima, seguida de algumas simplificações, resulta em:

$$F_{D_e} = \frac{\pi D_v^2}{4} \left\{ p_e + \rho \left[\frac{C_e}{2} (2-\beta^2) (V_{tr}-V_v)^2 + (1-\beta^2) (V_{tr}-V_v) |V_{tr}-V_v| \right] \right\} \quad (2.49)$$

A equação do movimento aplicada a um volume de controle entre as seções c e d (zona de esteira) resulta em:

$$F_{D_w} - \int_{\frac{D_v}{2}}^{\frac{D_t}{2}} p_d 2\pi r dr + \int_0^{\frac{D_t}{2}} p_e 2\pi r dr = - \int_{\frac{D_v}{2}}^{\frac{D_t}{2}} \rho (V_{tr}-V_v) |V_{tr}-V_v| 2\pi r dr + \int_0^{\frac{D_t}{2}} \rho (V-V_v) |V-V_v| 2\pi r dr \quad (2.50)$$

onde F_{D_w} = componente da força de arrasto na zona de esteira.

Substituindo a equação da continuidade e rearranjando:

$$F_{D_w} = -p_d \frac{\pi D_v^2}{4} + \underbrace{(p_d - p_c) \frac{\pi D_t^2}{4} + \rho \frac{\pi D_t^2}{4} \left[-(1-\beta^2) + (1-\beta^2)^2 \right] (V_{tr}-V_v) |V_{tr}-V_v|}_{\text{arrasto de base } (F_{D_B})} \quad (2.51)$$

Como $p_d - p_c = C_w \rho / 2 \left[(1 - \beta^2)^2 - 1 \right] (V_{tr} - V_v)^2$, a sua substituição na expressão acima, seguida de algumas simplificações, resulta em:

$$F_{Dw} = \frac{\pi D_v^2}{4} \left\{ -p_d + \rho \left[-\frac{C_w}{2} (2 - \beta^2) (V_{tr} - V_v)^2 - (1 - \beta^2) (V_{tr} - V_v) |V_{tr} - V_v| \right] \right\} \quad (2.52)$$

Componente da força de arrasto devido às pressões (F_{Dp}):

$$F_{Dp} = F_{De} + F_{Dw} = \frac{\pi D_v^2}{4} \left\{ \underbrace{(p_e - p_d)}_{F_{DpD}} + \rho \underbrace{\left[\frac{2 - \beta^2}{2} (C_e - C_w) (V_{tr} - V_v)^2 \right]}_{F_{DN} + F_{DB}} \right\} \quad (2.53)$$

(arrasto devido à dif. de pressões na região anular)

Substituindo (2.46) em (2.53), obtém-se:

$$F_{Dp} = \frac{\pi D_v^2}{4} \left\{ \frac{-\rho L_v}{2 D_t (1 - \beta^2)} \left[\beta f_v (V_{tr} - V_v) |V_{tr} - V_v| + f_w V_{tr} |V_{tr}| \right] + \right. \\ \left. + \rho / 2 (2 - \beta^2) (C_e - C_w) (V_{tr} - V_v)^2 \right\} \quad (2.54)$$

Componente da força de arrasto devido ao cisalhamento na parede do veículo (F_{Df}):

$$F_{Df} = \pi D_v L_v \tau_v = - \frac{\pi D_v L_v \rho f_v (V_{tr} - V_v) |V_{tr} - V_v|}{8} \frac{D_v}{D_v} = \\ = - \frac{\pi D_v^2}{4} \frac{\rho L_v f_v (V_{tr} - V_v) |V_{tr} - V_v|}{2 D_v} \quad (2.55)$$

Força de Arrasto Total (F_D): $F_D = F_{Dp} + F_{Df}$

$$\therefore F_D = \rho/2 \frac{\pi D_v^2}{4} \left\{ \frac{-L_v}{D_t(1-\beta^2)} \left[\left(\beta + \frac{(1-\beta^2)}{\beta} \right) f_v(V_{tr}-V_v) |V_{tr}-V_v| + f_w V_{tr} |V_{tr}| \right] + (2-\beta^2)(C_e-C_w)(V_{tr}-V_v)^2 \right\} \quad (2.56)$$

Simplificando:

$$F_D = \rho/2 \frac{\pi D_v^2}{4} \left\{ \frac{-L_v}{D_t(1-\beta^2)} \left[\frac{f_v}{\beta} (V_{tr}-V_v) |V_{tr}-V_v| + f_w V_{tr} |V_{tr}| \right] + (2-\beta^2)(C_e-C_w)(V_{tr}-V_v)^2 \right\} \quad (2.57)$$

As relações anteriores valem somente quando o trem estiver inteiramente contido no túnel. Para o trem entrando no túnel tem-se:

$$F_D = \rho/2 \frac{\pi D_v^2}{4} \left\{ \frac{-X_{V_e}}{D_t(1-\beta^2)} \left[\frac{f_v}{\beta} (V_{tr}-V_v) |V_{tr}-V_v| + f_w V_{tr} |V_{tr}| \right] + 2(1-\beta^2)(V_{tr}-V_v) |V_{tr}-V_v| + C_e(2-\beta^2)(V_{tr}-V_v)^2 + \frac{(L_v-X_{V_e})}{D_v} f_{V_v} V_v^2 + \frac{2p_b}{\rho} \right\} \quad (2.58)$$

Na saída do trem a força de arrasto total é calculada por:

$$F_D = \rho/2 \frac{\pi D_v^2}{4} \left\{ \frac{-(L_t-X_{V_e}+L_v)}{D_t(1-\beta^2)} \left[\frac{f_v}{\beta} (V_{tr}-V_v) |V_{tr}-V_v| + f_w V_{tr} |V_{tr}| \right] - 2(1-\beta^2)(V_{tr}-V_v) |V_{tr}-V_v| - C_w(2-\beta^2)(V_{tr}-V_v)^2 + \left[\frac{(X_{V_e}-L_t)}{D_v} f_{V_v+0,5} \right] V_v^2 - \frac{2p_i}{\rho} \right\} \quad (2.59)$$

Nas equações (2.58) e (2.59) X_{V_e} representa a posição da frente do trem no instante considerado e f_{V_v} é o coeficiente de atrito junto às paredes do veículo durante a sua permanência nas estações. Para a movimentação do trem nas estações, considerou-se

$$F_{D_e} = 0,5 \rho / 2 \frac{\pi D_v^2}{4} V_v^2 \text{ e } F_{D_w} \approx 0$$

2.3. Considerações sobre os dados experimentais concernentes às perdas de carga

Conforme mencionado na resenha literária [refs. 6 e 8], os dados experimentais sobre perdas de carga fornecem indicações razoavelmente precisas para certas faixas operacionais, enquanto para outras, fazem-se necessárias interpolações ou extrapolações que sempre requerem confirmação posterior quanto a sua margem de precisão.

Os dados existentes sobre coeficientes de atrito reais junto às paredes de túnel e do trem comparam, satisfatoriamente, com as curvas de Nikuradse para rugosidades relativas em torno de 10^{-3} . Utilizar-se-á, então, a fórmula de Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{RR}{3,3} \right] \quad \text{ou} \quad f = \frac{1,325474}{\log_e^2 \left[\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{RR}{3,3} \right]} \quad (2.60)$$

onde

f : coeficiente de atrito relacionado à expressão de Darcy para as perdas de carga.

RR : rugosidade relativa.

$$Re: \text{ n}^\circ \text{ de Reynolds} \left\{ \begin{array}{l} \text{Para a parede do túnel na região anular:} \\ Re_w = \frac{|V| (Dt - Dv)}{v} \quad (2.61) \\ \text{Para a parede do trem na região anular:} \\ Re_v = \frac{|V - V_v| (Dt - Dv)}{v} \quad (2.62) \\ \text{Para a parede do trem na estação:} \\ Re_{V_v} = \frac{V_v D_v}{v} \quad (2.63) \end{array} \right.$$

Para o duto de exaustão e poço de alívio também será usada a relação (2.60).

Na região "distante" do veículo, as nervuras transversais que compõem a ligação dos diversos elementos do túnel, produzem um nível de turbulência tal que o coeficiente de atrito praticamente independe do número de Reynolds, situando-se em torno de 0,1. Conforme mencionado na ref. [8], o seu valor exato depende das dimensões e forma das nervuras.

As perturbações ocasionadas pela frente e traseira do veículo nos valores dos coeficientes de atrito são levadas em conta através das velocidades do escoamento, sendo estas, funções da propagação de ondas de pressão geradas pelo trem.

Nas zonas de entrada e esteira, far-se-á uso das relações indicadas abaixo:

$$\text{Se } V_V = V: K_e = K_w = 0 \quad (2.64)$$

$$\text{Se } |V_V| > |V|: K_e = y\left(\frac{V_V - V}{V_V}\right) z \quad \text{e} \quad K_w = 1 \quad (V \geq 0) \quad (2.65)$$

$$\text{Se } |V| > |V_V| \begin{cases} V > 0: K_e = -1 \quad \text{e} \quad K_w = -y\left(\frac{V - V_V}{V}\right) z \\ V < 0: K_e = y\left(\frac{V_V - V}{V}\right) z \quad \text{e} \quad K_w = 1 \end{cases} \quad (2.66)$$

(valem também para $V_V = 0$)

$$(2.67)$$

onde y e z são funções da razão comprimento - diâmetro do veículo (L_V/D_V) e da razão de bloqueio (β), conforme indicado pela tabela do Apêndice. Estes dados foram obtidos através de um processamento semi-empírico, que utilizou leituras da força de arrasto sofrida pelo veículo, em regime permanente, no tubo de testes (ref.6). Apesar de sua obtenção ter sido condicionada a uma faixa de número de Reynolds do veículo bem próxima de 10^5 , eles podem ser utilizados para um intervalo razoavelmente amplo, sem perdas substanciais na precisão, conforme indicado na ref. [8].

3. RESOLUÇÃO NUMÉRICA

3.1. Aproximação por diferenças finitas

Para efeitos de resolução numérica, as zonas de entrada e de esteira serão concentradas nas seções correspondentes à frente e traseira do trem, respectivamente. Estas seções conterão, portanto, singularidades quanto a pressão e velocidade do escoamento.

Região "distante" do veículo

Multiplicando as equações (2.13) por dt e integrando-as, ao longo das linhas características (fig. 2), em um intervalo de tempo Δt , obtém-se:

$$C^+ \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\rho a} \int_{P_R}^{P_P} dp + \int_{V_R}^{V_P} dV + \frac{1}{2D_t} \int_{t-\Delta t}^t f_t V|V| dt = 0 \\ x_P \\ \int_{x_R}^{x_P} dx = \int_{t-\Delta t}^t (V+a) dt \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$$C^- \left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{\rho a} \int_{P_S}^{P_P} dp + \int_{V_S}^{V_P} dV + \frac{1}{2D_t} \int_{t-\Delta t}^t f_t V|V| dt = 0 \\ x_P \\ \int_{x_S}^{x_P} dx = \int_{t-\Delta t}^t (V-a) dt \end{array} \right.$$

Adota-se um Δt suficientemente pequeno de modo que as linhas características C^+ e C^- sejam linhas retas unindo P a R e S e, com inclinação $\frac{dx}{dt} = V+a$ e $\frac{dx}{dt} = V-a$, respectivamente.

Utilizando aproximações lineares do tipo

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x) dx = f(x_0) (x_1 - x_0),$$

as equações (3.1) ficam

$$C^+ \begin{cases} V_P - V_R + \frac{1}{\rho a} (p_P - p_R) + \frac{f_{tr} V_R |V_R| \Delta t}{2D_t} = 0 \\ x_P - x_R = (V_R + a) \Delta t \end{cases} \quad (3.2)$$

$$C^- \begin{cases} V_P - V_S - \frac{1}{\rho a} (p_P - p_S) + \frac{f_{ts} V_S |V_S| \Delta t}{2D_t} = 0 \\ x_P - x_S = (V_S - a) \Delta t \end{cases}$$

Zona de transferência

Usando o mesmo procedimento para as equações (2.20), em um intervalo de tempo $(\Delta t)_{tr}$, obtém-se

$$C^+ \begin{cases} V_P - V_R + \frac{1}{\rho a} (p_P - p_R) + \frac{f_{wR} V_{Rtr} |V_{Rtr}| (\Delta t)_{tr}}{2D_t(1-\beta^2)} + \frac{\beta f_{VR} (V_{Rtr} - V_V) |V_{Rtr} - V_V| (\Delta t)_{tr}}{2D_t(1-\beta^2)} = 0 \\ x_P - x_R = (V_R + a) \Delta t \end{cases}$$

$$C^- \begin{cases} V_P - V_S - \frac{1}{\rho a} (p_P - p_S) + \frac{f_{wS} V_{Str} |V_{Str}| (\Delta t)_{tr}}{2D_t(1-\beta^2)} + \frac{\beta f_{VS} (V_{Str} - V_V) |V_{Str} - V_V| (\Delta t)_{tr}}{2D_t(1-\beta^2)} = 0 \\ x_P - x_S = (V_S - a) \Delta t \end{cases}$$

Quando a frente do trem cruza com uma das curvas características, ocorre um salto de pressão expresso por:

$$\begin{aligned} (\Delta p)_e &= C_e \rho / 2 [1 - (1 - \beta^2)^2] (V_{Rtr} - V_V)^2 \text{ para a característica } C^+ \\ (\Delta p)_e &= -C_e \rho / 2 [1 - (1 - \beta^2)^2] (V_{Str} - V_V)^2 \text{ para a característica } C^- \end{aligned} \quad (3.4)$$

Analogamente, para a traseira do trem

$$(\Delta p)_w = C_{wp}/2 \left[(1-\beta^2)^2 - 1 \right] (V_{Rtr} - V_V)^2 \text{ no cruzamento com a característica } C^+$$

$$(\Delta p)_w = -C_{wp}/2 \left[(1-\beta^2)^2 - 1 \right] (V_{Str} - V_V)^2 \text{ no cruzamento com a característica } C^-$$

(3.5)

O intuito de se conseguir uma ampla faixa de variação dos parâmetros pertinentes ao sistema requer a resolução de diversos arranjos entre as curvas características e as curvas distância-tempo do veículo, conforme indicado na fig. 3. Este conjunto de arranjos pode ser abordado pela seguinte combinação das equações (3.2), (3.3), (3.4) e (3.5):

$$C^+ \left\{ \begin{aligned} & V_P - V_R + \frac{1}{\rho a} (p_P - p_R) + \frac{f_{tR}}{2D_t} V_E |V_E| \left[\Delta t - (\Delta t)tr_R \right] + \frac{f_{wR} V_{Rtr} |V_{Rtr}|}{2D_t (1-\beta^2)} (\Delta t)tr_R + \\ & \frac{\beta f_{VR} (V_{Rtr} - V_V) |V_{Rtr} - V_V| (\Delta t)tr_R (\xi_{eR} C_e - \xi_{wR} C_w)}{2D_t (1-\beta^2)} \left[1 - (1-\beta^2)^2 \right] (V_{Rtr} - V_V)^2 = 0 \\ & x_P - x_R = (V_R + a)\Delta t \end{aligned} \right.$$

$$C^- \left\{ \begin{aligned} & V_P - V_S - \frac{1}{\rho a} (p_P - p_S) + \frac{f_{tS}}{2D_t} V_D |V_D| \left[\Delta t - (\Delta t)tr_S \right] + \frac{f_{wS} V_{Str} |V_{Str}|}{2D_t (1-\beta^2)} (\Delta t)tr_S + \\ & \frac{\beta f_{VS} (V_{Str} - V_V) |V_{Str} - V_V| (\Delta t)tr_S (\xi_{eS} C_e - \xi_{wS} C_w)}{2D_t (1-\beta^2)} \left[1 - (1-\beta^2)^2 \right] (V_{Str} - V_V)^2 = 0 \\ & x_P - x_S = (V_S - a)\Delta t \end{aligned} \right.$$

onde

$(\Delta t)tr_R$ = período de tempo que a característica C^+ permanece na região de transferência, no intervalo (x_R, x_P) , (fig. 3).
 $0 \leq (\Delta t)tr_R \leq \Delta t$

$(\Delta t)tr_S$ = período de tempo que a característica C^- permanece na região de transferência, no intervalo (x_p, x_S)
 $0 \leq (\Delta t)tr_S \leq \Delta t$

$\xi_{eR}=1$ quando a característica C^+ cruza com a frente do trem no intervalo $[x_R, x_p]$, caso contrário $\xi_{eR}=0$

$\xi_{wR}=1$ quando a característica C^+ cruza com a traseira do trem no intervalo $[x_R, x_p]$, caso contrário $\xi_{wR} = 0$

$\xi_{eS}=1$ quando a característica C^- cruza com a frente do trem no intervalo $[x_p, x_S]$, caso contrário $\xi_{eS} = 0$

$\xi_{wS}=1$ quando a característica C^- cruza com a traseira do trem no intervalo $[x_p, x_S]$, caso contrário $\xi_{wS} = 0$

V_E e V_D : velocidades do ar fora da zona de transferência, em relação às curvas características C^+ e C^- respectivamente.

3.2. Método dos intervalos de tempo especificados

Duas maneiras comuns de se obter uma solução numérica, utilizando estas equações na forma de diferenças finitas, são: uso de rede de características e uso de intervalos de tempo especificados. O segundo método possui a vantagem de x_p e t_p serem valores assinalados e definitivos através dos cálculos. Isto deixa somente as duas incógnitas V_p e p_p a serem determinadas. O procedimento, quando aplicado a sistemas, possibilita uma solução bastante ordenada.

No método dos intervalos de tempo especificados, conhecidas as condições em A, B e C (fig. 2), avaliamos as condições em R e S através de interpolações lineares. Da fig. 2

$$\frac{x_C - x_R}{\Delta x} = \frac{V_C - V_R}{V_C - V_A} \quad (3.10)$$

Pelo uso da equação (3.7), reconhecendo que $x_p = x_C$,

$$(V_R + a) \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{V_C - V_R}{V_C - V_A} \quad (3.11)$$

Definindo $\theta = \frac{\Delta t}{\Delta x}$ e rearranjando a equação (3.11), obtém-se

$$V_R = \frac{V_C - \theta a(V_C - V_A)}{1 + \theta(V_C - V_A)} \quad (3.12)$$

Os valores interpolados para V_S , p_R , e p_S são obtidos analogamente

$$V_S = \frac{V_C - \theta a(V_C - V_B)}{1 - \theta(V_C - V_R)} \quad (3.13)$$

$$p_R = p_C - \theta(V_R + a)(p_C - p_A) \quad (3.14)$$

$$p_S = p_C + \theta(V_S - a)(p_C - p_B) \quad (3.15)$$

Somando as equações (3.6) e (3.8), explicitando V_P , tem-se

$$\begin{aligned} V_P = 0,5 \left\{ V_R + V_S + \frac{1}{\rho a}(p_R - p_S) - \frac{1}{2\Delta t} \left\{ f_{tr} [\Delta t - (\Delta t)tr_R] V_E |V_E| + \right. \right. \\ \left. + f_{ts} [\Delta t - (\Delta t)trs] V_D |V_D| \right\} - \frac{1}{2\Delta t(1-\beta^2)} \left\{ (\Delta t)tr_R [f_{wR} V_{Rtr} |V_{Rtr}| + \right. \\ \left. + \beta f_{VR} (V_{Rtr} - V_V) |V_{Rtr} - V_V| \right\} + (\Delta t)trs [f_{wS} V_{Str} |V_{Str}| + \\ \left. + \beta f_{VS} (V_{Str} - V_V) |V_{Str} - V_V| \right\} + \frac{1}{2a} \left\{ (\xi_{eR} C_e - \xi_{wR} C_w) [1 - (1-\beta^2)^2] (V_{Rtr} - V_V)^2 + \right. \\ \left. + (\xi_{eS} C_e - \xi_{wS} C_w) [1 - (1-\beta^2)^2] (V_{Str} - V_V)^2 \right\} \left. \right\} \quad (3.16) \end{aligned}$$

Subtraindo a equação (3.8) da (3.6), explicitando p_P , chega-se a

$$\begin{aligned}
 p_P = 0,5 \left\{ p_R + p_S + \rho a (V_R - V_S) - \frac{\rho a}{2D_t} \left\{ f_{tR} \left[\Delta t - (\Delta t)_{trR} \right] V_E |V_E| - \right. \right. \\
 \left. - f_{tS} \left[\Delta t - (\Delta t)_{trS} \right] V_D |V_D| \right\} - \frac{\rho a}{2D_t(1-\beta^2)} \left\{ (\Delta t)_{trR} \left[f_{wR} V_{Rtr} |V_{Rtr}| + \right. \right. \\
 \left. + \beta f_{VR} (V_{Rtr} - V_V) |V_{Rtr} - V_V| \right] - (\Delta t)_{trS} \left[f_{wS} V_{Str} |V_{Str}| + \right. \\
 \left. + \beta f_{VS} (V_{Str} - V_V) |V_{Str} - V_V| \right] \right\} + \frac{\rho}{2} \left\{ (\xi_{eR} C_e - \xi_{wR} C_w) \left[1 - (1-\beta^2)^2 \right] (V_{Rtr} - V_V)^2 - \right. \\
 \left. - (\xi_{eS} C_e - \xi_{wS} C_w) \left[1 - (1-\beta^2)^2 \right] (V_{Str} - V_V)^2 \right\} \quad (3.17)
 \end{aligned}$$

Com uma grade de interpolação é necessário que seis equações sejam resolvidas a fim de se encontrar V_P e p_P para um ponto interior. Elas são as equações (3.12) a (3.17).

Os pontos extremos com as condições de contorno correspondentes serão abordados "a posteriore".

Uma importante limitação deve ser reconhecida na escolha de Δt e Δx . Para estar assegurada a estabilidade e/ou convergência da solução é necessário que $\Delta t(V+a) \leq \Delta x$, onde a pode ser calculado pela relação $a = \sqrt{\frac{c_P}{c_V} g R T_m}$ e V corresponde à máxima velocidade esperada no sistema. Com isto as características através de P , C^+ e C^- , não cairão fora do segmento AB (fig. 2).

3.3. Cruzamento das linhas características com as curvas distância-tempo do veículo

3.3.a. Equações da intersecção

Para um período de tempo definido por $[t_P, t_P - \Delta t]$ tem-se

Equação da característica C^+ no intervalo $[x_R, x_P]$: $x_{C^+} = C_1 t + C_2$
(equação de uma reta) (3.18)

$$\text{Para } t = t_P - \Delta t: x_{C^+} = x_R = C_1(t_P - \Delta t) + C_2 \quad (3.19)$$

$$\text{Para } t = t_P: x_{C^+} = x_P = C_1 t_P + C_2 \quad (3.20)$$

Resolvendo o sistema formado pelas equações (3.19) e (3.20), juntamente com a substituição da equação (3.7), encontra-se $C_1 = V_R + a$ e $C_2 = x_P - (V_R + a)t_P$, (3.21)

$$\text{logo } x_{C^+} = (V_R + a)t + x_P - (V_R + a)t_P \quad (3.22)$$

Equação da característica C^- no intervalo $[x_P, x_S]: x_{C^-} = C_3 t + C_4$
(equação de uma reta). (3.23)

$$\text{Para } t = t_P - \Delta t: x_{C^-} = x_S = C_3(t_P - \Delta t) + C_4 \quad (3.24)$$

$$\text{Para } t = t_P: x_{C^-} = x_P = C_3 t_P + C_4 \quad (3.25)$$

Resolvendo o sistema formado pelas equações (3.24) e (3.25), juntamente com a substituição da equação (3.9), encontra-se $C_3 = V_S - a$ e $C_4 = x_P - (V_S - a)t_P$ (3.26)

$$\text{logo } x_{C^-} = (V_S - a)t + x_P - (V_S - a)t_P$$

Equação da frente do trem: $x_{V_e}(t) = C_5 t + C_6$ (equação de uma reta). (3.27)

$$\text{Para } t = t_P - \Delta t: x_{V_e}(t) = x_{V_e}(t_P - \Delta t) = C_5[t_P - \Delta t] + C_6 \quad (3.28)$$

$$\text{Para } t = t_P: x_{V_e}(t) = x_{V_e}(t_P) = C_5 t_P + C_6 \quad (3.29)$$

Resolvendo o sistema formado pelas equações (3.28) e (3.29) obtém-se

$$C_5 = \frac{x_{V_e}(t_P) - x_{V_e}(t_P - \Delta t)}{\Delta t} \text{ e } C_6 = x_{V_e}(t_P) - \frac{[x_{V_e}(t_P) - x_{V_e}(t_P - \Delta t)]}{\Delta t} t_P \quad (3.30)$$

logo

$$x_{V_e}(t) = \frac{[x_{V_e}(t_P) - x_{V_e}(t_P - \Delta t)]}{\Delta t} t + x_{V_e}(t_P) - \frac{[x_{V_e}(t_P) - x_{V_e}(t_P - \Delta t)]}{\Delta t} t_P \quad (3.31)$$

$$\text{Equação da traseira do trem: } x_{V_w}(t) = x_{V_e}(t) - L_V \quad (3.32)$$

Na intersecção da característica C^+ com a frente do trem $t = t_{IeR}$ e $x_{C^+} = x_{Ve}(t_{IeR}) = x_{IeR}$

Igualando as equações (3.22) e (3.31), após algumas simplificações resulta

$$t_{IeR} = t_P + \left[\frac{x_{Ve}(t_P) - x_P}{[V_R + a]\Delta t - x_{Ve}(t_P) + x_{Ve}(t_P - \Delta t)} \right] \Delta t \quad (3.33)$$

Pela equação (3.22) $x_{IeR} = (V_R + a)t_{IeR} + x_P - (V_R + a)t_P$, onde a substituição da equação (3.33) resulta em

$$x_{IeR} = x_P + \left[\frac{x_{Ve}(t_P) - x_P}{[V_R + a]\Delta t - x_{Ve}(t_P) + x_{Ve}(t_P - \Delta t)} \right] (V_R + a)\Delta t \quad (3.34)$$

Através de um procedimento análogo, obtém-se:

Na intersecção da característica C^+ com a traseira do trem $t = t_{IwR}$, $x_{C^+} = x_{Vw}(t_{IwR}) = x_{IwR}$,

$$t_{IwR} = t_P + \left[\frac{x_{Ve}(t_P) - x_P - L_V}{[V_R + a]\Delta t - x_{Ve}(t_P) + x_{Ve}(t_P - \Delta t)} \right] \Delta t \quad e \quad (3.35)$$

$$x_{IwR} = x_P + \left[\frac{x_{Ve}(t_P) - x_P - L_V}{[V_R + a]\Delta t - x_{Ve}(t_P) + x_{Ve}(t_P - \Delta t)} \right] (V_R + a)\Delta t \quad (3.36)$$

Na intersecção da característica C^- com a frente do trem $t = t_{IeS}$, $x_{C^-} = x_{Ve}(t_{IeS}) = x_{IeS}$,

$$t_{IeS} = t_P + \left[\frac{x_{Ve}(t_P) - x_P}{[V_S - a]\Delta t - x_{Ve}(t_P) + x_{Ve}(t_P - \Delta t)} \right] \Delta t \quad e \quad (3.37)$$

$$x_{IeS} = x_P + \left[\frac{x_{Ve}(t_P) - x_P}{[V_S - a]\Delta t - x_{Ve}(t_P) + x_{Ve}(t_P - \Delta t)} \right] (V_S - a)\Delta t \quad (3.38)$$

Na intersecção da característica C^- com a traseira do trem $t = t_{IWS}$, $x_{C^-} = x_{Vw}(t_{IWS}) = x_{IWS}$,

$$t_{IWS} = t_P + \left[\frac{x_{Ve}(t_P) - x_P - L_V}{[V_S - a]\Delta t - x_{Ve}(t_P) + x_{Ve}(t_P - \Delta t)} \right] \Delta t \quad e \quad (3.39)$$

$$x_{IWS} = x_P + \left[\frac{x_{Ve}(t_P) - x_P - L_V}{[V_S - a]\Delta t - x_{Ve}(t_P) + x_{Ve}(t_P - \Delta t)} \right] (V_S - a)\Delta t \quad (3.40)$$

3.3.b. Condições do cruzamento

Calculados os tempos e as posições dos cruzamentos das linhas características que passam por um ponto P, com a frente e traseira do veículo, através das equações (3.33) a (3.40), resta agora determinar as condições em que isto ocorre para o trecho da malha correspondente ao ponto em questão.

Se $x_R \leq x_{IeR} < x_P$: $\xi_{eR} = 1$	fig. 3: (c) e (f)
Se $x_{IeR} < x_R$ ou $x_{IeR} > x_P$: $\xi_{eR} = 0$	fig. 3: (a), (b), (d), (e), (g), (h), (i) e (j)
Se $x_R \leq x_{IwR} < x_P$: $\xi_{wR} = 1$	fig. 3: (f), (g) e (h)
Se $x_{IwR} < x_R$ ou $x_{IwR} > x_P$: $\xi_{wR} = 0$	fig. 3: (a), (b), (c), (d), (e), (i) e (j)
Se $x_P \leq x_{IeS} < x_S$: $\xi_{eS} = 1$	fig. 3: (d), (g), e (i)
Se $x_{IeS} < x_P$ ou $x_{IeS} > x_S$: $\xi_{eS} = 0$	fig. 3: (a), (b), (c), (e), (f), (h) e (j)
Se $x_P \leq x_{IwS} < x_S$: $\xi_{wS} = 1$	fig. 3: (i) e (j)
Se $x_{IwS} < x_P$ ou $x_{IwS} > x_S$: $\xi_{wS} = 0$	fig. 3: (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) e (h)

Se $x_{IeR} \leq x_R$ ou $x_{IwR} \geq x_P$:

$$(\Delta t)_{trR} = 0$$

$$V_{Rtr} = 0$$

$$V_E = V_R$$

fig.3: (a),(b),(i) e (j)

Se $x_{IeR} \leq x_P$ e $x_{IwR} < x_R$:

$$(\Delta t)_{trR} = t_{IeR} - t_P + \Delta t$$

$$V_{Rtr} = V_R$$

$$V_E = (V_{Rtr} - V_v)(1 - \beta^2) + V_v$$

fig.3: (c)

Se $x_{IeR} \leq x_P$ e $x_{IwR} \geq x_R$:

$$(\Delta t)_{trR} = t_{IeR} - t_{IwR}$$

$$V_{Rtr} = (V_R - V_v) / (1 - \beta^2) + V_v$$

$$V_E = V_R$$

fig.3: (f)

Se $x_{IeR} > x_P$ e $x_{IwR} < x_R$:

$$(\Delta t)_{trR} = \Delta t$$

$$V_{Rtr} = V_R$$

$$V_E = 0$$

fig.3: (d) e (e)

Se $x_{IeR} > x_P$ e $x_{IwR} \geq x_R$:

$$(\Delta t)_{trR} = t_P - t_{IwR}$$

$$V_{Rtr} = (V_R - V_v) / (1 - \beta^2) + V_v$$

$$V_E = V_R$$

fig.3: (g) e (h)

Se $x_{IeS} \leq x_P$ ou $x_{IwS} \geq x_S$:

$$(\Delta t)_{trS} = 0$$

$$V_{Str} = 0$$

$$V_D = V_S$$

fig.3: (a),(b),(c) e (f)

Se $x_{IeS} \leq x_S$ e $x_{IwS} < x_P$:

fig. 3: (d) e (g)

$$(\Delta t)_{trS} = t_P - t_{IeS}$$

$$V_{Str} = (V_S - V_V) / (1 - \beta^2) + V_V$$

$$V_D = V_S$$

Se $x_{IeS} \leq x_S$ e $x_{IwS} \geq x_P$:

fig. 3: (i)

$$(\Delta t)_{trS} = t_{IwS} - t_{IeS}$$

$$V_{Str} = (V_S - V_V) / (1 - \beta^2) + V_V$$

$$V_D = V_S$$

Se $x_{IeS} > x_S$ e $x_{IwS} < x_P$:

fig. 3: (e) e (h)

$$(\Delta t)_{trS} = \Delta t$$

$$V_{Str} = V_S$$

$$V_D = 0$$

Se $x_{IeS} > x_S$ e $x_{IwS} \geq x_P$:

fig. 3: (j)

$$(\Delta t)_{trS} = t_{IwS} - t_P + \Delta t$$

$$V_{Str} = V_S$$

$$V_D = (V_{Str} - V_V) / (1 - \beta^2) + V_V$$

3.4. Análise dos Pontos Extremos

Nas várias condições de contorno a serem tratadas utilizar-se-á as equações (3.6) ou (3.8), ou ambas, juntamente com condições introduzidas na fronteira. É conveniente reescrever estas equações em uma forma diferente. Para uma extremidade a montante a equação (3.8) torna-se

$$V_P = C_{1S} + C_{2S} p_P \quad (3.41)$$

onde

$$C_{1S} = V_S - \frac{p_S}{\rho a} - \frac{f_{tS}}{2D_t} V_D |V_D| \left[\Delta t - (\Delta t)_{trS} \right] - \frac{f_{wS} V_{Str} |V_{Str}| (\Delta t)_{trS}}{2D_t (1 - \beta^2)}$$

$$\frac{\beta f_{vS} (\Delta t)_{trS}}{2D_t (1 - \beta^2)} (V_{Str} - V_V) |V_{Str} - V_V| + \frac{1}{2a} (\xi_{eS} C_e - \xi_{wS} C_w) \left[1 - (1 - \beta^2)^2 \right] (V_{Str} - V_V)^2 \quad (3.42)$$

$$e \quad C_{2S} = \frac{1}{\rho a} \quad (3.43)$$

são funções de quantidades conhecidas e permanecem constantes durante cada passo no tempo. Na extremidade a jusante a equação (3.6) torna-se

$$V_P = C_{1R} + C_{2R}P_P \quad (3.44)$$

onde

$$C_{1R} = V_R + \frac{P_R}{\rho a} - \frac{f_{tR}}{2D_t} V_E |V_E| \left[\Delta t - (\Delta t)_{trR} \right] - \frac{f_{wR} V_{Rtr} |V_{Rtr}| (\Delta t)_{trR}}{2D_t(1-\beta^2)} - \frac{\beta f V_R (\Delta t)_{trR} (V_{Rtr} - V_V) |V_{Rtr} - V_V|}{2D_t(1-\beta^2)} - \frac{1}{2a} (\xi_{eR} C_e - \xi_{wR} C_w) \left[1 - (1-\beta^2)^2 \right] (V_{Rtr} - V_V)^2 \quad (3.45)$$

$$e \quad C_{2R} = \frac{1}{\rho a} \quad (3.46)$$

são constantes durante cada passo no tempo.

3.4.a. Entrada do túnel

Os valores de V_S e P_S são calculados, através das equações de interpolação (3.13) e (3.15). A condição de contorno da da pela equação (2.35) é reescrita na forma $pp_1 = -0,85\rho V_S^2$ (3.47) que, juntamente com a equação (3.41), possibilitam a obtenção de V_{P1} .

3.4.b. Saída de Exaustão

Aplicando a condição de contorno (2.37) nas equações (3.41) e (3.44), com a posterior substituição destas na equação da continuidade (2.36), obtém-se

$$V_4 = C_{14} + C_{24}P_4 \quad (3.48)$$

$$\text{onde } C_{14} = (C_{1R} - C_{1S}) \frac{\pi D_t^2 e}{4A_4} \quad e \quad C_{24} = (C_{2R} - C_{2S}) \frac{\pi D_t^2 e}{4A_4} \quad (3.49)$$

A diferença de pressão através do orifício com ventiladores que simula a saída de exaustão, é provocada pelo efeito líquido entre a diferença de pressão impingida pelos ventiladores e

as perdas de carga localizadas e distribuídas ao longo dos dutos.

Logo

$$(\Delta p)_{\text{saída de exaustão}} = \underbrace{p_4 - p_{\text{atm}}^0}_{\text{valores manométricos}} = \rho/2 f_4 \frac{L_{4eq.}}{D_{h4}} V_4^2 - (\Delta p)_{\text{vent.}} + (\Delta p)_{\text{inso}} \quad (3.50)$$

onde $L_{4eq.}$ e D_{h4} são respectivamente o comprimento equivalente e o diâmetro hidráulico dos dutos de exaustão, $(\Delta p)_{\text{vent}}$ é uma função da descarga, conforme expresso pela curva característica dos ventiladores e $(\Delta p)_{\text{inso}}$ é a perda de carga associada ao insonorizador, que normalmente é instalado para diminuir o nível de ruído dos ventiladores axiais.

A curva característica dos ventiladores será aproximada por polinômios do terceiro grau, utilizando a técnica dos mínimos quadrados com restrições. As peculiaridades e vantagens deste método serão discutidos posteriormente. Pode-se, então, definir

$$(\Delta p)_{\text{vent}} = g_{i1} + g_{i2} A_4 V_4 + g_{i3} A_4^2 V_4^2 + g_{i4} A_4^3 V_4^3 \quad (3.51)$$

que, substituindo na equação (3.50), produz

$$p_4 = \rho/2 f_4 \frac{L_{4eq.}}{D_{h4}} V_4^2 - (g_{i1} + g_{i2} A_4 V_4 + g_{i3} A_4^2 V_4^2 + g_{i4} A_4^3 V_4^3) + (\Delta p)_{\text{inso}} \quad (3.52)$$

A substituição da equação (3.52) na (3.48), após algumas simplificações, resulta em

$$\begin{aligned} & -C_{24} A_4^3 g_{i4} V_4^3 + C_{24} \left(\frac{\rho}{2} f_4 \frac{L_{4eq.}}{D_{h4}} - A_4^2 g_{i3} \right) V_4^2 - (1 + C_{24} A_4 g_{i2}) V_4 + \\ & + C_{14} - C_{24} [g_{i1} + (\Delta p)_{\text{inso}}] = 0 \end{aligned} \quad (3.53)$$

Dividindo por $(-C_{24} A_4^3 g_{i4})$ e designando

$$u_1 = \frac{-(\rho/2 f_4 L_{4eq.}/D_{h4} - A_4^2 g_{i3})}{A_4^3 g_{i4}}$$

$$u_2 = \frac{1 + C_{24} A_4 g_{i2}}{C_{24} A_4^3 g_{i4}} \quad e \quad (3.54)$$

$$u_3 = \frac{C_{24} [g_{i1} - (\Delta p)_{inso}] - C_{14}}{C_{24} A_4^3 g_{i4}}, \text{ resulta}$$

$$V_4^3 + u_1 V_4^2 + u_2 V_4 + u_3 = 0 \quad (3.55)$$

A equação cúbica acima pode ser reduzida, pela substituição $VP_4 = (x - \frac{u_1}{3})$, à forma normal:

$$x^3 + u_A x + u_B = 0 \quad (3.56)$$

onde $u_A = \frac{3u_2 - u_1^2}{3} \quad (3.57)$

$$u_B = \frac{2u_1^3 - 9u_1 u_2 + 27u_3}{27}$$

As soluções da equação (3.56) são dadas por:

$$x_1 = u_s + u_T \quad \text{ou} \quad V_{41} = u_s + u_T - u_1/3 \quad (3.58)$$

$$x_2 = -\frac{1}{2} (u_s + u_T) + \frac{i\sqrt{3}}{2} (u_s - u_T) \quad \text{ou}$$

$$V_{42} = -\frac{1}{2} (u_s + u_T) + \frac{i\sqrt{3}}{2} (u_s - u_T) - \frac{u_1}{3} \quad (3.59)$$

$$x_3 = \frac{1}{2} (u_s + u_T) - \frac{i\sqrt{3}}{2} (u_s - u_T) \quad \text{ou}$$

$$V_{43} = -\frac{1}{2} (u_s + u_T) - \frac{i\sqrt{3}}{2} (u_s - u_T) - \frac{u_1}{3} \quad (3.60)$$

onde $i^2 = -1$, $u_D = \frac{u_B^2}{4} + \frac{u_A^3}{27}$ (discriminante) (3.61)

$$u_s = \sqrt{-\frac{u_B}{2}} + \sqrt{u_D} \quad \text{e} \quad u_T = \sqrt{-\frac{u_B}{2}} - \sqrt{u_D} \quad (3.62)$$

Se u_1 , u_2 e u_3 são reais (e, por conseguinte, se u_A e u_B são reais), e

Se $u_D > 0$, existe uma raiz real e duas raízes imaginárias conjugadas.

Se $u_D = 0$, existem três raízes reais das quais ao menos duas são iguais

Se $u_D < 0$, existem três raízes reais desiguais

Se $u_D < 0$, as fórmulas anteriores são impraticáveis. As raízes reais são:

$$x_1 = 2\sqrt{-\frac{u_A}{3}} \cos\left(\frac{\phi}{3}\right) \quad \text{ou} \quad V_{41} = 2\sqrt{-\frac{u_A}{3}} \cos\left(\frac{\phi}{3}\right) - \frac{u_1}{3} \quad (3.63)$$

$$x_2 = 2\sqrt{-\frac{u_A}{3}} \cos\left(\frac{\phi}{3} + 120^\circ\right) \quad \text{ou} \quad V_{42} = 2\sqrt{-\frac{u_A}{3}} \cos\left(\frac{\phi}{3} + 120^\circ\right) - \frac{u_1}{3} \quad (3.64)$$

$$x_3 = 2\sqrt{-\frac{u_A}{3}} \cos\left(\frac{\phi}{3} + 240^\circ\right) \quad \text{ou} \quad V_{43} = 2\sqrt{-\frac{u_A}{3}} \cos\left(\frac{\phi}{3} + 240^\circ\right) - \frac{u_1}{3} \quad (3.65)$$

onde $\cos \phi = \sqrt[3]{\frac{u_B^2}{4} + \frac{u_A^3}{27}}$ (3.66)

O sinal superior é utilizado se u_B é positivo e o sinal inferior se u_B é negativo.

Sequência de Cálculo:

Equações utilizadas	Resultados obtidos
1. (3.12) a (3.15)	V_R, V_S, P_R e P_S
2. (3.42), (3.43), (3.45) e (3.46)	C_{1S}, C_{2S}, C_{1R} e C_{2R}
3. (3.49)	C_{14} e C_{24}
4. (3.54)	u_1, u_2 e u_3
5. (3.57)	u_A e u_B
6. (3.61)	u_D
7. Verifica-se o sinal de u_D	
Se $u_D > 0$:	
8. (3.62)	u_s e u_T
9. (3.58)	V_4
10. (3.48)	$P_{P1} = P_{P2}$
11. (3.41) e (3.44)	V_{P2} e V_{P1} (respectivamente)
Se $u_D = 0$:	
8. (3.62)	u_s e u_T
9. (3.58) ou (3.59) = (3.60): dependen do de qual resultado esti ver na faixa de estabili dade da curva caracterís tica dos ventiladores	V_4
10. (3.48)	$P_{P1} = P_{P2}$
11. (3.41) e (3.44)	V_{P2} e V_{P1} (respectivamente)
Se $u_D < 0$:	
8. Verifica-se o sinal de u_B	
9. (3.66)	ϕ
10. (3.63) ou (3.64) ou (3.65): dependen do de qual resultado esti	V_4

ver na faixa de estabilidade da curva característica dos ventiladores

11. (3.43) $PP_1 = PP_2$
 12. (3.41) e (3.44) VP_2 e VP_1 (respectivamente)

Obs. 1: Nas expressões (3.54) utiliza-se V_4 de passo anterior no tempo para cálculo de f_4 .

Obs. 2: É usual escolherem-se os ventiladores de exaustão de tal forma que as vazões operacionais não caiam fora da faixa de estabilidade de sua curva característica (Vide ref. [29]).

3.4.c. Poço de Alívio

Aplicando a condição de contorno (2.39) nas equações (3.41) e (3.44), com posterior substituição destas na equação da continuidade (2.38), obtém-se

$$VP_5 = C_{15} + C_{25} p_5 \quad (3.67)$$

$$\text{onde } C_{15} = (C_{1R} - C_{1S}) \frac{\pi D_t^2}{4A_5} \quad \text{e} \quad C_{25} = (C_{2R} - C_{2S}) \frac{\pi D_t^2}{4A_5} \quad (3.68)$$

A diferença de pressão através do orifício que simula o poço é provocada pelas perdas de carga localizadas e distribuídas ao longo dos dutos. Logo

$$(\Delta p)_{\text{poço de alívio}} = \underbrace{p_5 - p_{\text{atm}}}_{\text{valores manométricos}} = \rho/2 f_5 \frac{L_{5eq.}}{D_{h5}} V_5 |V_5| \quad (3.69)$$

valores manométricos

onde $L_{5eq.}$ e D_{h5} são respectivamente o comprimento equivalente e o diâmetro hidráulico do poço.

Conforme mencionado anteriormente, a válvula de abertura de alívio permanecerá aberta somente quando o trem estiver localizado entre a saída de exaustão e o fim do túnel. Logo, quando a válvula estiver fechada, $V_5 = 0$ e os valores de $VP_2 = VP_3$ e p_5 são cal-

culados tal qual os demais pontos internos da malha (eqs. (3.12) a (3.17)).

Para o caso da válvula estar aberta, pode-se calcular p_5 através da expressão abaixo, obtida através da substituição da equação (3.67) na (3.69).

$$p_5 = \rho/2 f_5 \frac{L_{5eq.}}{D_{h5}} (C_{15} + C_{25} p_5) | C_{15} + C_{25} p_5 | \quad (3.70)$$

obtidos do passo anterior no tempo

Sequência de cálculo: (para a válvula aberta)

Equações utilizadas	Resultados obtidos
(3.12) a (3.15)	V_R, V_S, P_R e P_S
(3.42), (3.43), (3.45) e (3.46)	C_{1s}, C_{2s}, C_{1R} e C_{2R}
(3.68)	C_{15} e C_{25}
(3.70)	$PP_2 = PP_3$
(3.67)	V_5
(3.41) e (3.44)	VP_3 e VP_2 (respectivamente)

Obs.: Na expressão (3.70) utiliza-se V_5 do passo anterior no tempo para o cálculo de f_5 . Quando este valor de V_5 é zero (no passo anterior a válvula ainda não estava aberta), f_5 é calculado usando a velocidade dada pela equação (3.67), na qual substitui-se a pressão p_5 do passo anterior.

3.4.d. Saída do Túnel

Os valores de V_R e p_R são calculados através das equações de interpolação (3.12) a (3.14). Se VP_3 do passo anterior no tempo for maior ou igual a zero, vale a condição de contorno (2.40), caso contrário, a (2.41). A substituição de uma destas condições de contorno na equação (3.44) possibilita o cálculo de VP_3 .

3.5. Método dos mínimos quadrados com restrições

Neste trabalho, a técnica dos mínimos quadrados com res-

trições é utilizada para interpolar a curva característica dos ventiladores e, as curvas de velocidade e posição da frente do trem vs. tempo. Para esta aplicação, as principais vantagens são a sua relativa simplicidade e a possibilidade de ajuste, segundo o grau de precisão desejado.

O método consiste, basicamente, em dividir o intervalo total em sub intervalos, e para cada um atribuir um polinômio do 3º grau como função de ajuste. A junção dos polinômios deve estar submetida às seguintes restrições:

- a) o valor da função de 1ª. derivada devem ser os mesmos para garantir uma continuidade da função.
- b) o valor da 2ª. derivada deve ser o mesmo, para garantir a mesma curvatura.

Dividindo, por exemplo, o intervalo total em dois sub intervalos, tem-se os polinômios interpoladores.

$$y_1(x) = a_1 + b_1x + c_1x^2 + d_1x^3 \quad e$$

$$y_2(x) = a_2 + b_2x + c_2x^2 + d_2x^3$$

sujeitos às seguintes restrições na junção ($x = x_0$):

$$(a) \quad a_1 + b_1x_0 + c_1x_0^2 + d_1x_0^3 = a_2 + b_2x_0 + c_2x_0^2 + d_2x_0^3$$

$$\therefore \psi_1 = (a_1 - a_2) + (b_1 - b_2)x_0 + (c_1 - c_2)x_0^2 + (d_1 - d_2)x_0^3 = 0$$

$$(b) \quad b_1 + 2c_1x_0 + 3d_1x_0^2 = b_2 + 2c_2x_0 + 3d_2x_0^2$$

$$\therefore \psi_2 = (b_1 - b_2) + 2x_0(c_1 - c_2) + 3x_0^2(d_1 - d_2) = 0$$

$$(c) \quad 2c_1 + 6d_1x_0 = 2c_2 + 6d_2x_0$$

$$\therefore \psi_3 = 2(c_1 - c_2) + 6x_0(d_1 - d_2) = 0$$

Pela teoria dos multiplicadores de Lagrange:

$$S^2 = \frac{1}{N_1 - 1} \sum_{i=1}^{N_1} \left[y_1 - y_1(x_i) \right]^2 + \frac{1}{N_2 - 1} \sum_{i=1}^{N_2} \left[y_2 - y_2(x_i) \right]^2 + \lambda_1 \psi_1 + \lambda_2 \psi_2 + \lambda_3 \psi_3$$

onde

x_i, y_i : abscissas e ordenadas, respectivamente, dos pontos a serem interpolados,

N_1, N_2 : número de pontos a serem interpolados, em cada sub intervalo, e

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: multiplicadores de Lagrange associados a cada restrição.

Condições de minimização, com restrições:

$$\frac{\partial S^2}{\partial a_1} = 0, \quad \frac{\partial S^2}{\partial b_1} = 0, \quad \frac{\partial S^2}{\partial c_1} = 0, \quad \frac{\partial S^2}{\partial d_1} = 0,$$

$$\frac{\partial S^2}{\partial a_2} = 0, \quad \frac{\partial S^2}{\partial b_2} = 0, \quad \frac{\partial S^2}{\partial c_2} = 0, \quad \frac{\partial S^2}{\partial d_2} = 0,$$

$$\frac{\partial S^2}{\partial \lambda_1} = \psi_1 = 0, \quad \frac{\partial S^2}{\partial \lambda_2} = \psi_2 = 0, \quad \frac{\partial S^2}{\partial \lambda_3} = \psi_3 = 0$$

Rearranjando o sistema de equações lineares resultante, em forma matricial, obtém-se:

$$\begin{bmatrix}
 N_1 \sum_{i=1}^{N_1} x_i \\
 N_1 \sum_{i=1}^{N_1} x_i^2 \\
 N_1 \sum_{i=1}^{N_1} x_i^3 \\
 N_1 \sum_{i=1}^{N_1} x_i^4 \\
 N_1 \sum_{i=1}^{N_1} x_i^5 \\
 N_1 \sum_{i=1}^{N_1} x_i^6 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 1 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 N_2 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^2 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^3 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^4 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^5 \\
 N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^2 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^3 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^4 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^5 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^6 \\
 N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^2 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^3 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^4 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^5 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^6 & -x_0^3 \\
 N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^3 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^4 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^5 & N_2 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^6 & -x_0^2 & -x_0^3 \\
 -1 & x_0^2 & x_0^3 & 3x_0^2 & 2x_0 & 3x_0^2 \\
 0 & 1 & 2x_0 & 3x_0^2 & -2x_0 & -3x_0^2 \\
 0 & 0 & x_0 & 6x_0 & -2 & -6x_0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \frac{N_1-1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{(N_1-1)x_0}{2} & \frac{N_1-1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{(N_1-1)x_0^2}{2} & \frac{2(N_1-1)x_0}{2} & \frac{2(N_1-1)}{2} & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{(N_1-1)x_0^3}{2} & \frac{3(N_1-1)x_0^2}{2} & \frac{6(N_1-1)x_0}{2} & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1-N_2}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{(1-N_2)x_0}{2} & \frac{1-N_2}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{(1-N_2)x_0^2}{2} & \frac{2(1-N_2)x_0}{2} & \frac{2(1-N_2)}{2} & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{(1-N_2)x_0^3}{2} & \frac{3(1-N_2)x_0^2}{2} & \frac{6(1-N_2)x_0}{2} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 a_1 \\
 b_1 \\
 c_1 \\
 d_1 \\
 a_2 \\
 b_2 \\
 c_2 \\
 d_2 \\
 \lambda_1 \\
 \lambda_2 \\
 \lambda_3
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 N_1 \sum_{i=1}^{N_1} y_i \\
 N_1 \sum_{i=1}^{N_1} y_i x_i \\
 N_1 \sum_{i=1}^{N_1} y_i x_i^2 \\
 N_1 \sum_{i=1}^{N_1} y_i x_i^3 \\
 N_2 \sum_{i=1}^{N_2} y_i \\
 N_2 \sum_{i=1}^{N_2} y_i x_i \\
 N_2 \sum_{i=1}^{N_2} y_i x_i^2 \\
 N_2 \sum_{i=1}^{N_2} y_i x_i^3 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}$$

A resolução deste sistema fornece os coeficientes dos polinômios interpoladores.

Efetuando a divisão do intervalo total em M sub intervalos tem-se M polinômios, ou seja, $4M$ coeficientes a determinar. Como há $M-1$ pontos de junção tem-se $3(M-1)$ multiplicadores de Lagrange. Logo, o número total de variáveis perfaz $7M-3$.

3.6. Programa para computador digital

O fluxograma básico do programa encontra-se na fig. 4. A fim de propiciar uma maior rapidez na análise dos resultados, foram inseridos, na leitura de dados, indicadores da existência de ventilação forçada e poço de alívio no túnel, possibilitando a simulação sem alterar o programa, das seguintes situações:

- (a) ventilação natural (devido somente ao efeito de pistão), sem poço de alívio.
- (b) ventilação natural (devido somente ao efeito de pistão), com poço de alívio.
- (c) Efeito de pistão mais ventilação forçada, sem poço de alívio.
- (d) Efeito de pistão mais ventilação forçada, com poço de alívio.

Apesar do programa ter sido montado para a configuração geométrica da fig. 1 e para o caso em que o intervalo de tempo entre a passagem de dois trens consecutivos é maior que o tempo de travessia do túnel, ele pode ser facilmente adaptado a outras situações, utilizando os mesmos princípios discutidos neste trabalho.

A estruturação do programa foi feita de maneira a permitir uma visualização clara dos diversos passos envolvidos na execução, além de facilitar eventuais correções ou alterações de seus componentes. A sua otimização, em termos computacionais, dependerá dos objetivos específicos a serem almejados em futuras aplicações.

A listagem, em FORTRAN IV, é apresentada a seguir.

SISTEMA DE VENTILACAO EM TUNEIS DE METRO , TIPO COURACA
DISTRIBUICOES DE PRESSAO , VELOCIDADE , VAZAO E ARRASTO AERODINAMICO

```
REAL*8 DDE(9), DB(50), DDP(50), DG(2,4), DT1(9), DTIME1(50), DXND2(50), D  
*RX(2,4), DVND2(50), DAV(2,4), DT2(9), DTIME2(50), DXND3(50), DBX(2,4), DV  
*ND3(50), DBV(2,4), DT3(9), DTIME3(50), DXND4(50), DCX(2,4), DVND4(50), DC  
*V(2,4)  
DIMENSION P1(38,101), V1(38,101), P2(38/74,101), V2(38/74,101), P3(74/  
*75,101), V3(74/75,101), Q1(101), Q2(101), Q3(101), Q4(101), Q5(101), Q1MC  
*(3), Q2MC(3), Q3MC(3), Q4MC(3), Q5MC(3), PD(101), XVE(2700), VV(2700), PL1  
*(202), PL2(150), B(50), BE(5), DP(50), TIMEE1(9), TIME1(50), XND2(50), VND  
*2(50), S(2,4), RX(2,4), BV(2,4), TIMEE2(9), TIMEE3(9), TIME2(50), TIME3(5  
*0), XND3(50), XND4(50), VND3(50), VND4(50), BX(2,4), BV(2,4), CX(2,4), CV(2  
*4), P1E(38), V1E(38), P2E(38/74), V2E(38/74), P3E(74/75), V3E(74/75)
```

LEITURA DE DADOS

CARACTERISTICAS DO FLUIDO

```
READ(2,1)TEMPI, GPCV, R, RD, AMI
```

```
FORMAT(4F9.4, E10.1)
```

CARACTERISTICAS GEOMETRICAS E DE PERDA DE CARGA

```
READ(2,2)DIW, ALV, DIT, ALT, DIH4, A4, ALEN4, DIH5, A5, ALEN5, DPIN50, NAA
```

```
FORMAT(11F7.1, 13)
```

INCREMENTOS

```
READ(2,3)DX, DT
```

```
FORMAT(4F4.0, F5.3)
```

DADOS EXPERIMENTAIS

```
READ(2,4)V, Z, BRTZ, DRPD, FT, FITR, FIPO
```

```
FORMAT(2F5.3, 5F10.5)
```

INTERVALO DE TEMPO ENTRE A PASSAGEM DE DOIS TRENS CONSECUTIVOS

NUMERO DE PERIODOS NO TEMPO , A SEREM ANALIZADOS

INDICADOR DA EXISTENCIA DE POCO DE ALIVIO NO TUNEL

INDICADOR DA EXISTENCIA DE VENTILACAO FORCADA

```
READ(2,5)XWAY, NPT, KFA, KVF
```

```
FORMAT(F7.2, 3I3)
```

VAZES DEVIDO SOMENTE A VENTILACAO FORCADA

```
READ(2,6)QVF, QVFE, QVFD
```

```
FORMAT(3F10.2)
```

```
IF(KVF.EQ.0)GO TO 1061
```

CURVA CARACTERISTICA DOS VENTILADORES DE EXAUSTAO - INTERPOLACAO
NUMERICA PELO METODO DOS MINIMOS QUADRADOS , COM RESTRICOES

```
READ(2,7)NPE1, (RECI), I=1, NPE1
```

```
FORMAT(12, 2F10.3)
```

```
READ(2,8)NFI, (RCI), DP(1), I=1, NFI
```

```
FORMAT(13, 7, 10F10.2)
```

```
DO 1001 I=1, NPE1
```

```
DOE(1)=RECI
```

```
DO 1002 I=1, NFI
```

```
RCI(1)=RCI
```

```
DDP(1)=DP(1)
```

```
CALL SUBROUTINEFAC(CY, RPL, CA, CDP, DD)
```

```
NPE11=NPE1-1
```

```
DO 1003 I=1, NPE11
```

```
DO 1004 J=1, NFI
```

```
BCI(1,3)=DDCI(1,3)
```

```
NFI1=NFI-1
```

FORMAT(14, 10F10.2) CURVA CARACTERISTICA DOS VENTILADORES DE EXAUSTAO

```

ND=1
N=101
M=2
NL=N
N5=0
IFI=3
IJK=1
DQPL=(RE(NPE1)-RE(1))/100
DO 4326 I=1,N
PL1(I)=FLOAT(1-I)*DQPL+RE(1)
IN=I+N
IF(PL1(I).GT.RE(IJK+1))IJK=IJK+1
PL1(IN)=G(IJK,1)+G(IJK,2)*PL1(I)+G(IJK,3)*PL1(I)**2+G(IJK,4)*PL1(I
*)**3
CALL PLOT(N0,PL1,N,M,NL,N5,IFI)

```

CURVAS: VELOCIDADE E POSICAO DA FRENTE DO TREM VS. TEMPO - INTERPOLACAO NUMERICA PELO METODO DOS MINIMOS QUADRADOS, COM RESTRICOES

```

READ(2,30)NPE2,(TIMEE1(I),I=1,NPE2)
FORMAT(I2,3F10.3)
READ(2,31)NP2,(TIME1(I),XND2(I),VND2(I),I=1,NP2)
FORMAT(I3,/, (8F10.3))
DO 1204 I=1,NPE2
DT1(I)=TIMEE1(I)
DO 1205 I=1,NP2
DTIME1(I)=TIME1(I)
DXND2(I)=XND2(I)
DVND2(I)=VND2(I)
CALL SUBINT(NPE2,DT1,NP2,DTIME1,DXND2,DBX)
CALL SUBINT(NPE2,DT1,NP2,DTIME1,DVND2,DBV)
NPE21=NPE2-1
DO 1206 I=1,NPE21
DO 1206 J=1,4
BX(I,J)=DBX(I,J)
BV(I,J)=DBV(I,J)
READ(2,32)NPE3,(TIMEE2(I),I=1,NPE3)
FORMAT(I2,3F10.3)
READ(2,33)NP3,(TIME2(I),XND3(I),VND3(I),I=1,NP3)
FORMAT(I3,/, (8F10.3))
DO 1207 I=1,NPE3
DT2(I)=TIMEE2(I)
DO 1208 I=1,NP3
DTIME2(I)=TIME2(I)
DXND3(I)=XND3(I)
DVND3(I)=VND3(I)
CALL SUBINT(NPE3,DT2,NP3,DTIME2,DXND3,DBX)
CALL SUBINT(NPE3,DT2,NP3,DTIME2,DVND3,DBV)
NPE31=NPE3-1
DO 1209 I=1,NPE31
DO 1209 J=1,4
BX(I,J)=DBX(I,J)
BV(I,J)=DBV(I,J)
READ(2,34)NPE4,(TIMEE3(I),I=1,NPE4)
FORMAT(I2,3F10.3)
READ(2,35)NP4,(TIME3(I),XND4(I),VND4(I),I=1,NP4)
FORMAT(I3,/, (8F10.3))
DO 1210 I=1,NPE4
DT3(I)=TIMEE3(I)
DO 1211 I=1,NP4
DTIME3(I)=TIME3(I)
DXND4(I)=XND4(I)
DVND4(I)=VND4(I)
CALL SUBINT(NPE4,DT3,NP4,DTIME3,DXND4,DBX)

```

```
CALL SUBINT(NPE4, DTR, NP4, DTIME3, DVND4, DCV)
NPE41=NPE4-1
DO 1212 I=1, NPE41
DO 1212 J=1, 4
CX(I, J)=DCX(I, J)
CV(I, J)=DCV(I, J)
```

DETERMINACAO DA VEL. E POSICAO DO TREM EM FUNCAO DO TEMPO

```
DO 36 I=2, NPE2
NT1=1FIX(TIMEE1(I-1)/DT)+1
NT2=1FIX(TIMEE1(I)/DT)+1
DO 36 N=NT1, NT2
T=(FLOAT(N)-1.)*DT
XVE(N)=BX(I-1, 1)+BX(I-1, 2)*T+BX(I-1, 3)*T**2+BX(I-1, 4)*T**3
VV(N)=BV(I-1, 1)+BV(I-1, 2)*T+BV(I-1, 3)*T**2+BV(I-1, 4)*T**3
XVE(1)=0.
VV(1)=0.
```

```
NT1=1FIX(TIMEE2(NPE2)/DT)+1
NT2=1FIX(TIMEE2(1)/DT)+1
DO 37 N=NT1, NT2
T=(FLOAT(N)-1.)*DT
XVE(N)=-281.6684+28.5536*T
VV(N)=28.000
```

```
DO 38 I=2, NPE3
NT1=1FIX(TIMEE2(I-1)/DT)+1
NT2=1FIX(TIMEE2(I)/DT)+1
DO 38 N=NT1, NT2
T=(FLOAT(N)-1.)*DT
XVE(N)=BX(I-1, 1)+BX(I-1, 2)*T+BX(I-1, 3)*T**2+BX(I-1, 4)*T**3
VV(N)=BV(I-1, 1)+BV(I-1, 2)*T+BV(I-1, 3)*T**2+BV(I-1, 4)*T**3
NT1=1FIX(TIMEE3(NPE3)/DT)+1
NT2=1FIX(TIMEE3(1)/DT)+1
```

```
DO 39 N=NT1, NT2
T=(FLOAT(N)-1.)*DT
XVE(N)=281.1117+11.1111*T
VV(N)=11.39
```

```
DO 40 I=3, NPE4
NT1=1FIX(TIMEE3(I-1)/DT)+1
NT2=1FIX(TIMEE3(I)/DT)+1
DO 40 N=NT1, NT2
T=(FLOAT(N)-1.)*DT
XVE(N)=CX(I-1, 1)+CX(I-1, 2)*T+CX(I-1, 3)*T**2+CX(I-1, 4)*T**3
VV(N)=CV(I-1, 1)+CV(I-1, 2)*T+CV(I-1, 3)*T**2+CV(I-1, 4)*T**3
VV(NT2)=0.
XVE(NT2)=XND4(NP4)
```

```
NSRID=NT2
NN=(NSRID-1)/360
```

```
WRITE(1, 16) XVE(1), 11.1, NSRID, NN
```

```
FORMAT(1H1, 20X, 5HP051000 DA PLENTE DO TREM (N) A TEMPO (S
```

```
PG), 77777, 11F12.4), 7777)
```

```
ND=0
```

```
N=NSRID/360-1
```

```
N=2
```

```
AL=N
```

```
MB=0
```

```
IF1=0
```

```
DO 45 I=1, N
```

```
PL1(I)=FLOAT(N-I+1)*XND+01
```

```
PL2(I)=XND-1+2-10
```

```
IF1=I+N
```

```
PL1(I)=XND+XND
```

```
CALL PL1, PL2, PL1, PL2, PL, MB, IF1
```

```
WRITE(1, 16) XVE(1), 11.1, NSRID, NN
```

FORMAT(1H1,37X,4BHVELOCIDADE DO TREM (M/SEG) * TEMPO (SEG)

/////, (18F12.4), ///)

ID=2

DO 17 I=1, N

IMN=1+(MN-1)*(I-1)

IN=I+M

PL1(IN)=VV(IMN)

CALL PLOT(MD, PL1, M, N, NL, NS, IFI)

PARAMETROS AUXILIARES

ALT2=ALT/2.

MMED=IFIX(ALT/(2.*DX))+1

MMAX=IFIX(ALT/DX)+1

MAR=MMAX-MAR

MAR1=MAR-1

MAR2=MAR+1

DTTOT=HWRV

DTOTAL=IFIX(DTTOT/DT)+1

BETA=DIV/DT

BETA=DT/DX

A=SQRT(9.81*GPDV*R*TEMPM)

DISTRIBUICAO INICIAL DE VELOCIDADES, PRESSOES E VAZDES, DEVIDO
SOMENTE A VENTILACAO FORCADA

DO 41 M=1, MMED

V1(M,1)=QVFE/(.7854*DT**2)

V1E(M)=V1(M,1)

DO 42 M=MMED, MAR

V2(M,1)=QVFD/(.7854*DT**2)

V2E(M)=V2(M,1)

DO 43 M=MAR, MMAX

V3(M,1)=QVFD/(.7854*DT**2)

V3E(M)=V3(M,1)

VGE=QVF/R4

VGE=0.

IF(KVF.EQ.0)GO TO 1562

NPE11=NPE1-1

DO 44 I=1, NPE11

IF(QVF.GT.RE(1+1))GO TO 44

DPVENT=G(1,1)+G(1,2)*QVF+G(1,3)*QVF**2+G(1,4)*QVF**3

GO TO 45

CONTINUE

RE4=ABS(QV4E)*DIH4/RNI

F4=0.

IF(RE4.EQ.0)GO TO 47

IF(RE4.GT.2200.)GO TO 1115

F4=54./RE4

GO TO 47

F4=1.325474/(ALDG(2.51/CRE4+SQRT(FIPG))+RRFG/2.32)**4

P1(MMED,1)=R0/2.+F4*ALDR4/DIH4+V4E+ABS(V4E)-DPVENT+DFINED

GO TO 1562

P1(MMED,1)=0.

P1(MMED)=P1(MMED,1)

P2(MMED,1)=P1(MMED,1)

P2(MMED)=P2(MMED,1)

FTR=FT

MMED1=MMED-1

DO 50 N=1, MMED1

P1(N,1)=P1(MMED,1)+R0/2.+FTR*P1(MMED)-M0+DX/DT+V1(N,1)+ABS(V1(N,1))

,100

P1(N)=P1(N,1)

```

P2(M,1)=P2(MMED,1)+RD/2.*FTR*FLOAT(MMED-M)*DX/DIT*V2(M,1)*ABS(V2(M
*,1))
P2E(M)=P2(M,1)
MMAX1=MMAX-1
DO 56 M=MMAX,MMAX
P3(M,1)=P2(MMED,1)+RD/2.*FTR*FLOAT(MMED-M)*DX/DIT*V3(M,1)*ABS(V3(M
*,1))
P3E(M)=P3(M,1)
PDEXT=P1(1,1)+.B5*RD*V1(1,1)**2
Q1(1)=QVFE
Q2(1)=QVFD
Q3(1)=Q2(1)
Q4(1)=QVF
Q4E=Q4(1)
Q5(1)=0.
Q1M=0.
Q2M=0.
Q3M=0.
Q4M=0.
Q5M=0.
FD(1)=0.
FDN=FD(1)/2.

```

PROGRAMA PRINCIPAL

[illegible]

```

V5=CV1E(M)-TETA*A*(CV1E(M)-V1E(M+1))/((1.-TETA*(CV1E(M)-V1E(M+1)))
P5=P1E(M)+TETA*(V5-R)*(P1E(M)-P1E(M+1))
CALL SIDER(X,T,N,DT,A,ALV,ANI,DIT,DIV,BETA,VR,XVE,VV,Y,Z,DTTR,AKS
IER,AKSIWR,FTR,FVR,FWR,AKER,AKNR,VRTR,VE,RRTR,FITR,FT)
CALL SIDES(X,T,N,DT,A,ALV,ANI,DIT,DIV,BETA,V5,XVE,VV,Y,Z,DTTR5,AKS
IES,AKSIWS,FTS,FVS,FWS,AKES,AKNS,VSTR,VD,RRTR,FITR,FT)
V1E1=V1E(M)
V1E(M)=.5B*(VR+V5+1./((RO+A)*(PR-P5))-1./((2.*DIT)*(FTR*(DT-DTTR)+VE*AB
S(VE)+FTS*(DT-DTTR5)+VD*ABS(VD)))-1./((2.*DIT*(1.-BETA**2)))*(DTTR
R*(FWR+VRTR+ABS(VRTR)+BETA*FVR*(VRTR-VV(N))+ABS(VRTR-VV(N)))+DTTR5
*(FWS+VSTR+ABS(VSTR)+BETA*FVS*(VSTR-VV(N))+ABS(VSTR-VV(N)))+1./((2
.*A)*((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIER-AKSIWR)+BETA**4*(AKER*AKSIER+AK
NR*AKSIWR))*(VRTR-VV(N))**2+((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIES-AKSIWS)
+BETA**4*(AKES+AKSIES+AKNS+AKSIWS))*(VSTR-VV(N))**2))
P1E1=P1E(M)
P1E(M)=.5B*(PR+P5+RO*A*(VR-V5)-RO*A/((2.*DIT)*(FTR*(DT-DTTR)+VE*AB
S(VE)-FTS*(DT-DTTR5)+VD*ABS(VD))-RO*A/((2.*DIT*(1.-BETA**2)))*(DTTR
R*(FWR+VRTR+ABS(VRTR)+BETA*FVR*(VRTR-VV(N))+ABS(VRTR-VV(N)))-DTTR5+
(FWS+VSTR+ABS(VSTR)+BETA*FVS*(VSTR-VV(N))+ABS(VSTR-VV(N)))-RO/2.*
((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIER-AKSIWR)+BETA**4*(AKER*AKSIER+AKNR*AK
SIWR))*(VRTR-VV(N))**2+((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIES-AKSIWS)+BETA
**4*(AKES+AKSIES+AKNS+AKSIWS))*(VSTR-VV(N))**2))
Q1EM=V1E(M)*.785379*DIT**2
IF(XVE(N).GE.X.AND.XVELV.LE.X)Q1EM=Q1EM*(1.-BETA**2)
Q1E=Q1E+Q1EM
IF(N.EQ.1107)GO TO 155
GO TO 10
P1(M,1002)=P1E(M)
V1(M,1002)=V1E(M)
CONTINUE
N=N+1
X=(FLOAT(N)-1.)*DX
VR=CV1E(M)-TETA*A*(CV1E(M)-V1E1)/((1.+TETA*(CV1E(M)-V1E1))
PR=P1E(M)-TETA*(VR+A)*(P1E(M)-P1E1)
CALL SIDER(X,T,N,DT,A,ALV,ANI,DIT,DIV,BETA,VR,XVE,VV,Y,Z,DTTR,AKS
IER,AKSIWR,FTR,FVR,FWR,AKER,AKNR,VRTR,VE,RRTR,FITR,FT)
V5=CV2E(M)-TETA*A*(CV2E(M)-V2E(M+1))/((1.-TETA*(CV2E(M)-V2E(M+1)))
P5=P2E(M)+TETA*(V5-R)*(P2E(M)-P2E(M+1))
CALL SIDES(X,T,N,DT,A,ALV,ANI,DIT,DIV,BETA,V5,XVE,VV,Y,Z,DTTR5,AKS
IES,AKSIWS,FTS,FVS,FWS,AKES,AKNS,VSTR,VD,RRTR,FITR,FT)
D1=VR+PR/((RO+A)-FTR/((2.*DIT)*VE+ABS(VE)+(DT-DTTR)-FWR*DTTR/((2.*D
IT*(1.-BETA**2))+VRTR+ABS(VRTR)-BETA*FVR*DTTR/((2.*DIT*(1.-BETA**2
)))+(VRTR-VV(N))+ABS(VRTR-VV(N))+1./((2.*A)*((1.-(1.-BETA**2)**2)*(A
KSIER-AKSIWR)+BETA**4*(AKER*AKSIER+AKNR*AKSIWR))*(VRTR-VV(N))**2
D1L=-1./((RO+A)
D2=V5+P5/((RO+A)-FTS/((2.*DIT)*VD+ABS(VD)+(DT-DTTR5)-FWS*DTTR5/((2.*D
IT*(1.-BETA**2))+VSTR+ABS(VSTR)-BETA*FVS*DTTR5/((2.*DIT*(1.-BETA**2
)))+(VSTR-VV(N))+ABS(VSTR-VV(N))+1./((2.*A)*((1.-(1.-BETA**2)**2)*(A
KSIES-AKSIWS)+BETA**4*(AKES+AKSIES+AKNS+AKSIWS))*(VSTR-VV(N))**2
D2L=-1.*D1L
D1D=1.571*DIT**2/RA*(D1-D2)
D1DL=1.571*DIT**2/RA*(D1L-D2L)
IF(XVE(N).LT.X.AND.XVELV.GT.X)GO TO 1507
D1D=D1D*(1.-BETA**2)
D1DL=D1DL*(1.-BETA**2)
VE=ABS(V4E)*DIT/ANI
IF(REQ357,07,55
P4=0
GO TO 59
IF(REQ,07,2306)GO TO 1117
P4=50./REQ4
GO TO 59
P4=1.225*P4*(ALOG(51/((KEX-ENRT(CF160))+RBPEN(3.0))**4)

```

```

DD 6B I=1, NPE11
IF(Q4E. LE. QE(I+1))GO TO 61
CONTINUE
U1=-C12L*(RD*F4*ALEQ4/(2.*DIH4)-A4**2*G(I,3))/C12L*A4**3*G(I,4))
U2=(1.+C12L*A4*G(I,2))/C12L*A4**3*G(I,4))
U3=(C12L*(G(I,1)-DPINSD)-C12)/C12L*A4**3*G(I,4))
UA=(3.*U2-U1**2)/3.
UB=(-9.*U1*U2+27.*U3+2.*U1**3)/27.
UD=UB**2/4.+UA**3/27.
IF(UD>146.147,62
CTETAV=SQRT(UB**2/4./(-UA**3/27.))
IF(UB.GT.0.)CTETAV=-1.*CTETAV
STETAV=SQRT(1.-CTETAV**2)
TTETAV=STETAV/CTETAV
TETAV=ATAN(TTETAV)
DD 911 I=1,3
V4E=2.*SQRT(-UA/3.)*COS(TETAV/3.+FLOAT(I-1)*2.0943)-U1/3.
Q4E=V4E*A4
IF(Q4E. GE. QE(1). AND. Q4E. LE. QE(NPE1))GO TO 181
CONTINUE
GO TO 181
V4E=-2.*SQRT(-UA/3.)*U1/3.
IF(UB.LT.0.)V4E=-1.*V4E
Q4E=V4E*A4
IF(Q4E. GE. QE(1). AND. Q4E. LE. QE(NPE1))GO TO 181
V4E=SQRT(-UA/3.)*U1/3.
IF(UB.LT.0.)V4E=-1.*V4E
Q4E=V4E*A4
GO TO 181
U5=(-UB/2.+SQRT(UD))*333333
UT=(-UB/2.-SQRT(UD))*333333
V4E=U5+UT-U1/3.
Q4E=V4E*A4
IVER=4
P1E(M)=(V4E-C12)/C12L
GO TO 1565
P1E(M)=80*F4*ALEQ4/(2.*DIH4)*(C12+C12L*P1E(M))*ABS(C12+C12L*P1E(M)
*)
V4E=C12+C12L*P1E(M)
Q4E=V4E*A4
P2E1=P2E(M)
P2E(M)=P1E(M)
V1E(M)=C1+C1L*P1E(M)
V2E1=V2E(M)
V2E(M)=C2+C2L*P2E(M)
Q1EM=V1E(M)*.39259+DIT**2
Q2E=V2E(M)*.39269+DIT**2
IF(XVE(M).LT.X.OR.XVELV.GT.U)GO TO 1002
Q1EM=Q1EM*(1.-BETA**2)
Q2E=Q2E*(1.-BETA**2)
Q1E=X.*DN/BLT*(Q1E+Q1EM)
Q1MOCK=Q1MOCK+Q1E
Q1MOCK=Q1MOCK+Q1E
IF(X.EQ.1TOT)GO TO 100
GO TO 107
P1CM.1000=P1E(M)
V1CM.1000=V1E(M)
P2CM.1000=P2E(M)
V2CM.1000=V2E(M)
Q1C1002=Q1E
Q1C1002=Q1E
DD 11 M=KNED2,8881
X=(FLOAT(M)-1.)*DN
VR=(V2E(M)-TETRA*(V2E(M)-V2E1))/C1.+TETRA*(V2E(M)-V2E1)

```

PR=P2E(M)-TETA*(VR+A)*(P2E(M)-P2E1)

V5=(V2E(M)-TETA*A*(V2E(M)-V2E(M+1)))/(1.-TETA*(V2E(M)-V2E(M+1)))

P5=P2E(M)+TETA*(V5-A)*(P2E(M)-P2E(M+1))

CALL SIDER(X, T, N, DT, R, ALV, ANI, DIT, DIV, BETA, VR, XVE, VV, V, Z, DTTR, AKS
*IER, AKSIHR, FTR, FVR, FWR, AKER, AKNR, VRTR, VE, RRTR, FITR, FT)

CALL SIDER(X, T, N, DT, R, ALV, ANI, DIT, DIV, BETA, V5, XVE, VV, V, Z, DTTR5, AKS
*IES, AKSINS, FTS, FVS, FWS, AKES, AKNS, VSTR, VD, RRTR, FITR, FT)

V2E1=V2E(M)

V2E(M)=.5B*(VR+V5+1./((RD+A)*(PR-P5)-1./((2.*DIT)*(FTR*(DT-DTTR)+VE
ABS(VE)+FT5*(DT-DTTR5)+VD*ABS(VD))-1./((2.*DIT*(1.-BETA2))*(DTTR
R(FVR*VRTR+ABS(VRTR)+BETA*FVR*(VRTR-VV(N))*ABS(VRTR-VV(N)))+DTTR5
**((FWS+VSTR+ABS(VSTR)+BETA*FVS*(VSTR-VV(N))*ABS(VSTR-VV(N)))+1./((2
*.*A)*((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIER-AKSIHR)+BETA**4*(AKER*AKSIER+A
*KNR*AKSIHR)))+(VRTR-VV(N))**2+((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIES-AKSINS)
BETA4*(AKES*AKSIES+AKNS*AKSINS)))+(VSTR-VV(N))**2))

P2E1=P2E(M)

P2E(M)=.5B*(PR+P5+RD+A*(VR-V5)-RD+A/(2.*DIT)*(FTR*(DT-DTTR)+VE+AB
S(VE)-FT5(DT-DTTR5)+VD*ABS(VD))-RD+A/(2.*DIT*(1.-BETA**2))*(DTTR
**((FVR*VRTR+ABS(VRTR)+BETA*FVR*(VRTR-VV(N))*ABS(VRTR-VV(N)))-DTTR5+
*(FWS+VSTR+ABS(VSTR)+BETA*FVS*(VSTR-VV(N))*ABS(VSTR-VV(N)))+RD/2.*
*(((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIER-AKSIHR)+BETA**4*(AKER*AKSIER+AKNR*A
*KSIHR)))+(VRTR-VV(N))**2-((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIES-AKSINS)+BETA
4*(AKES*AKSIES+AKNS*AKSINS)))+(VSTR-VV(N))2))

Q2EM=V2E(M)*.785379*DIT**2

IF(XVE(N).GE.X.AND.XVELV.LE.X)Q2EM=Q2EM*(1.-BETA**2)

Q2E=Q2E+Q2EM

IF(N.EQ.ITDT)GO TO 158

GO TO 11

P2(M,IC02)=P2E(M)

V2(M,IC02)=V2E(M)

CONTINUE

M=KRA

X=(FLORT(M)-4.)*DX

VR=(V2E(M)-TETA*A*(V2E(M)-V2E1))/(1.+TETA*(V2E(M)-V2E1))

PR=P2E(M)-TETA*(VR+A)*(P2E(M)-P2E1)

CALL SIDER(X, T, N, DT, R, ALV, ANI, DIT, DIV, BETA, VR, XVE, VV, V, Z, DTTR, AKS
*IER, AKSIHR, FTR, FVR, FWR, AKER, AKNR, VRTR, VE, RRTR, FITR, FT)

V5=(V2E(M)-TETA*A*(V2E(M)-V2E(M+1)))/(1.-TETA*(V2E(M)-V2E(M+1)))

P5=P2E(M)+TETA*(V5-A)*(P2E(M)-P2E(M+1))

CALL SIDER(X, T, N, DT, R, ALV, ANI, DIT, DIV, BETA, V5, XVE, VV, V, Z, DTTR5, AKS
*IES, AKSINS, FTS, FVS, FWS, AKES, AKNS, VSTR, VD, RRTR, FITR, FT)

IF(KPA.ER.B)GO TO 1358

IF(XVE(M).GT.ALY2)GO TO 62

V2E(M)=.5B*(VR+V5+1./((RD+A)*(PR-P5)-1./((2.*DIT)*(FTR*(DT-DTTR)+VE
ABS(VE)+FT5*(DT-DTTR5)+VD*ABS(VD))-1./((2.*DIT*(1.-BETA2))*(DTTR
R(FVR*VRTR+ABS(VRTR)+BETA*FVR*(VRTR-VV(N))*ABS(VRTR-VV(N)))+DTTR5
**((FWS+VSTR+ABS(VSTR)+BETA*FVS*(VSTR-VV(N))*ABS(VSTR-VV(N)))+1./((2
*.*A)*((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIER-AKSIHR)+BETA**4*(AKER*AKSIER+A
*KNR*AKSIHR)))+(VRTR-VV(N))**2+((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIES-AKSINS)
BETA4*(AKES*AKSIES+AKNS*AKSINS)))+(VSTR-VV(N))**2))

PRE(M)=.5B*(PR+P5+RD+A*(VR-V5)-RD+A/(2.*DIT)*(FTR*(DT-DTTR)+VE+AB
S(VE)-FT5(DT-DTTR5)+VD*ABS(VD))-RD+A/(2.*DIT*(1.-BETA**2))*(DTTR
**((FVR*VRTR+ABS(VRTR)+BETA*FVR*(VRTR-VV(N))*ABS(VRTR-VV(N)))-DTTR5+
*(FWS+VSTR+ABS(VSTR)+BETA*FVS*(VSTR-VV(N))*ABS(VSTR-VV(N)))+RD/2.*
*(((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIER-AKSIHR)+BETA**4*(AKER*AKSIER+AKNR*A
*KSIHR)))+(VRTR-VV(N))**2-((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIES-AKSINS)+BETA
4*(AKES*AKSIES+AKNS*AKSINS)))+(VSTR-VV(N))2))

V2E1=V2E(M)

V2E(M)=V2E(M)

P2E1=P2E(M)

P2E(M)=P2E(M)

V2E=V2E

GO TO 1066

```

*IT*(1.-BETA**2))*VRTR+ABS(VRTR)-BETA*FVR+DTTRR/(2.*DIT*(1.-BETA**2
*))*(VRTR-VV(N))*ABS(VRTR-VV(N))+1./((2.*A)*((1.-BETA**2)**2)*(A
+KSIER-AKSIWR)+BETA**4*(AKER+AKSIER+AKWR+AKSIWR))*(VRTR-VV(N))+2
C2L=-1./((R0+A)
C2=V5-P5/(R0+A)-F75/(2.*DIT)*VD+ABS(VD)*(DT-DTTR5)-FWS*DTTR5/(2.*D
*IT*(1.-BETA**2))*VSTR+ABS(VSTR)-BETA*FV5+DTTR5/(2.*DIT*(1.-BETA**2
*))*(VSTR-VV(N))*ABS(VSTR-VV(N))+1./((2.*A)*((1.-BETA**2)**2)*(A
+KSIER-AKSIWR)+BETA**4*(AKER+AKSIER+AKWR+AKSIWR))*(VSTR-VV(N))+2
C3L=-1.*C2L
C23=.7854*DIT**2/A5*(C2-C3)
C23L=.7854*DIT**2/A5*(C2L-C3L)
IF(XVE(N).LT.X.DR.XVELV.GT.X)GO TO 1098
C23=C23*(1.-BETA**2)
C23L=C23L*(1.-BETA**2)
3 RES=ABS(VSE)*DIHS/ANI
IF(RES)64,64,65
4 VSE=C23+C23L*P2E(N)
RES=ABS(VSE)*DIHS/ANI
5 IF(RES.GT.2388.)GO TO 1118
F5=64./RES
GO TO 1119
6 F5=1.325474/(ALD3(2,51/(RES+SQRT(FIPD))+RRPO/3,3))**2
7 P2E(N)=R0*F5*ALE5/(2.*DIHS)*(C23+C23L*P2E(N))+ABS(C23+C23L*P2E(N)
+
8 P3E1=P2E(N)
P3E(N)=P2E(N)
V2E(N)=C2+C2L*P2E(N)
V3E1=V2E(N)
V3E(N)=C3+C3L*P2E(N)
VSE=C23+C23L*P2E(N)
9 Q2E=V2E(N)*.39269*DIT**2
Q3E=V3E(N)*.39269*DIT**2
IF(XVE(N).LT.X.DR.XVELV.GT.X)GO TO 68
Q2E=Q2E*(1.-BETA**2)
Q3E=Q3E*(1.-BETA**2)
10 Q2E=2.*DN/(ALT-2.*FLDRT(NAR)+DN)*(Q2E+Q3E)
QSE=VSE+A5
Q2ND(K)=Q2ND(K)+Q2E
Q3ND(K)=Q3ND(K)+Q3E
IF(N.EQ.ITOT)GO TO 160
GO TO 161
P2(N,1000)=P2E(N)
V2(N,1000)=V2E(N)
P3(N,1000)=P3E(N)
V3(N,1000)=V3E(N)
Q2(1000)=Q2E
Q3(1000)=Q3E
IF(NAR.EQ.1000 TO 70
DO 69 N=NAR2,NXN1
N=(FLDRT(N)-1)*DN
VE=(V2E(N)-TETR*A*(V2E(N)-V3E1))/(1.+TETR*(V2E(N)-V3E1))
PE=P2E(N)-TETR*(VR+A)*(P2E(N)-PE1)
VE=(V2E(N)-TETR*A*(V2E(N)-V2E(N+1)))/(1.+TETR*(V2E(N)-V2E(N+1)))
PE=P2E(N)+TETR*(V5-R)*(P2E(N)-PE(N+1))
CALL SIDER(N,T,N,DT,B,DLV,ANI,DIT,DIY,PTA,VE,V5,VV,Y,Z,DTTR,AKS
+IER,AKSIWR,FTR,FVR,FWR,AKWR,AKNR,VRTR,VE,DATE,FTR,FT)
CALL SIDER(N,T,N,DT,B,DLV,ANI,DIT,DIY,PTA,VE,V5,VV,Y,Z,DTTR,AKS
+IES,AKSIWR,FTR,FVR,FWR,AKWR,AKNR,VRTR,VD,PTA,FTR,FT)
VIE1,VTE(N)
V2E(N)=VD*(VE+VE+1./((R0+A)*(PR-PS))-1./((2.*DIT)*FTR*(DT-DTTR5)-VF
+ABS(VF)-FTR*(DT-DTTR5)*V5-PR*(V5+1.-V5-DIT*(1.-BETA**2))))

```

```
*R*(FMR*VRTR+ABS(VRTR)+BETA*FVR*(VRTR-VV(N))+ABS(VRTR-VV(N)))+DTTR5
**CFMS*VSTR*ABS(VSTR)+BETA*FVS*(VSTR-VV(N))+ABS(VSTR-VV(N)))+1./2
*. *A)*((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIER-AKSIWR)+BETA**4*(AKER*AKSIER+A
*KNR*AKSIWR))*(VRTR-VV(N))**2+((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIES-AKSIWS)
**BETA**4*(AKES*AKSIES+AKNS*AKSIWS))*(VSTR-VV(N))**2))
```

P3E1=P3E(M)

```
P3E(M)=.5B*(PR+PS+RO+A*(VR-VS)-RO*A/(2.*DIT)+(FTR+(DT-DTTR)*VE*AB
*5(VE)-FIS*(DT-DTTR5)+VD+ABS(VD))-RO*A/(2.*DIT*(1.-BETA**2))+(DTTR
*(FMR*VRTR+ABS(VRTR)+BETA*FVR*(VRTR-VV(N))+ABS(VRTR-VV(N)))-DTTR5+
*(FMS*VSTR+ABS(VSTR)+BETA*FVS*(VSTR-VV(N))+ABS(VSTR-VV(N)))+RO/2.*
*((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIER-AKSIWR)+BETA**4*(AKER*AKSIER+AKNR*A
*SIWR))*(VRTR-VV(N))**2+((1.-(1.-BETA**2)**2)*(AKSIES-AKSIWS)+BETA
**4*(AKES*AKSIES+AKNS*AKSIWS))*(VSTR-VV(N))**2))
```

Q2EM=V3E(M)*.785375*DIT**2

IF(XVE(M).GE.X.AND.XVELV.LE.X)Q2EM=Q2EM*(1.-BETA**2)

Q2E=Q2E+Q2EM

IF(M.EQ.ITOT)GO TO 162

GO TO 69

P3(M,1002)=P3E(M)

V3(M,1002)=V3E(M)

CONTINUE

K=MMAX

X=(FLOAT(M)-1.)+DX

VR=(V3E(M)-TETA*A*(V3E(M)-V3E1))/(1.+TETA*(V3E(M)-V3E1))

PR=P3E(M)-TETA*(VR+A)*(P3E(M)-P3E1)

CALL SIDER(K,T,N,DT,A,ALV,ANI,DIT,DIV,BETA,VR,XVE,VV,Y,Z,DTTR,AKS
*IER,AKSIWR,FTR,FVR,FMR,AKER,AKNR,VRTR,VE,RTTR,FTR,FT)

IF(V3E(M).GE.0.)GO TO 151

P3E(M)=PDEXT-.83*RO*VR**2

GO TO 152

P3E(M)=PDEXT

V3E(M)=VR-1./2*(RO+A)*(P3E(M)-PR)-FTR/(2.*DIT)+VE+ABS(VE)*(DT-DTTR
+A)-FMR+DTTR/(2.*DIT*(1.-BETA**2))+VRTR+ABS(VRTR)-BETA*FVR+DTTR/(
*2.*DIT*(1.-BETA**2))*(VRTR-VV(N))+ABS(VRTR-VV(N))+1./2*(2.*A)*((1.-
*1.-BETA**2)**2)*(AKSIER-AKSIWR)+BETA**4*(AKER*AKSIER+AKNR*AKSIWR)
***(VRTR-VV(N))**2

Q2EM=V3E(M)*.785375*DIT**2

IF(XVE(M).GE.X.AND.XVELV.LE.X)Q2EM=Q2EM*(1.-BETA**2)

Q2E=DX/(FLOAT(NNA)*DX)*(Q2E+Q2EM)

IF(M.EQ.ITOT)GO TO 162

GO TO 164

P3(M,1000)=P3E(M)

V3(M,1000)=V3E(M)

Q2(1000)=Q2E

ITOT=ITOT+MUTOT

Q2MCK=Q2MCK+Q2E

VR=0.

MMAX=MIN(MMAX,MMAX+1)

MMAX=MAX(MMAX,MIN(MMAX,MMAX+1))

IF(MMAX.LT.MMAX+1)

MMAX=MAX(MMAX,MIN(MMAX,MMAX+1))

IF(MMAX.LT.MMAX+1)GO TO 162

IF(MMAX.LT.MMAX+1)GO TO 71

IF(MMAX.LT.MMAX+1)GO TO 71

IF(MMAX.LT.MMAX+1)GO TO 162

GO TO 162

GO TO 162

VR=VR+FLOAT(M)/A*(V3E1-V3E)

GO TO 69

GO TO 162

VR=VR+V3E(M)

IT=IT+1

VR=VR+V3E(M)

IF(MMAX.LT.MMAX+1)GO TO 162

```

GO TO 74
DO 860 1=MPVT,MPVF
VTR=VTR+VZE(I)
VTR=VTR/FLDRT(MPVF-MPVT+1)
GO TO 74
DO 862 1=MPVT,MNED
VTR=VTR+VIE(I)
DO 864 1=MNED,MPVF
VTR=VTR+VZE(I)
VTR=VTR/FLDRT(MPVF-MPVT+1)
GO TO 74
DO 861 1=MPVT,MPVF
VTR=VTR+VIE(I)
VTR=VTR/FLDRT(MPVF-MPVT+1)
VEL=(VTR-VV(N))*CL-BETA**2+VV(N)
FV=B.
FW=B.
FVV=B.
RKE=B.
RKN=B.
IF(VV(N).EQ.0..AND.VEL.EQ.0.)GO TO 81
RKN=1.
IF(ABS(VV(N))-ABS(VEL))76,76,75
RKE=Y+((VV(N)-VEL)/VV(N))**2
GO TO 79
IF(VEL)77,77,78
RKE=Y+((VEL-VV(N))/VEL)**2
GO TO 78
RKE=-1.
RKN=-Y+((VEL-VV(N))/VEL)**2
REV=ABS(VTR-VV(N))*CDIT-DIV/ANI
IF(REV.EQ.0)GO TO 82
IF(REV.GT.2138.)GO TO 1129
FV=.54./REV
GO TO 80
FV=1.225474/(ALDDB(2.51/(REV+SQRT(FITR))+RATR/3.3))**2
REV=ABS(VTR)*CDIT-DIV/ANI
IF(REV.EQ.0)GO TO 81
IF(REV.GT.2138.)GO TO 1129
FW=.54./REV
GO TO 81
FW=1.225474/(ALDDB(2.51/(REV+SQRT(FITR))+RATR/3.3))**2
CH=1.-RKE*BETA**2/(2.-BETA**2)
CU=1.-RKN*BETA**2/(2.-BETA**2)
IF(XVEL)CH,D.158 TO 7771
REV=VV(N)*DIV/ANI
IF(REV.GT.2138.)GO TO 7771
FVV=.54./REV
GO TO 7771
FVV=1.225474/(ALDDB(2.51/(REV+SQRT(FITR))+RATR/3.3))**2
FLE=CD/3.47584+1.4+2.4*(VV(N)/CDIT+CL-BETA**2)*(FV/BETA-CVTR+
- V(N))-ABS(VTR-VV(N))+FW+VTR+ABS(VTR))*2.+(CL-BETA**2)*(VTR-VV(N))+
-ABS(VTR-VV(N))-CH*(2.-BETA**2)*(VTR-VV(N))-2*(ALI-XVE(N)/DIV+FW
- VV(N)-VEL)*FLE/FRM
GO TO 1111
IF(MR)HALL,ALTD TO TYPE
REV=VV(N)*DIV/ANI
IF(REV.EQ.0)GO TO 7771
IF(FV)HALL,ALTD TO TYPE
FV=.54./REV
GO TO 7771
FV=1.225474/(ALDDB(2.51/(REV+SQRT(FITR))+RATR/3.3))**2
FLE=CD/3.47584+1.4+2.4*(VV(N)/CDIT+CL-BETA**2)*(FV/BETA-CVTR+
- V(N))-ABS(VTR-VV(N))+FW+VTR+ABS(VTR))*2.+(CL-BETA**2)*(VTR-VV(N))+
-ABS(VTR-VV(N))-CH*(2.-BETA**2)*(VTR-VV(N))-2*(ALI-XVE(N)/DIV+FW
- VV(N)-VEL)*FLE/FRM

```

```

*-(N))+(ABS(VTR-VV(N))-DN*(2.-BETA**2)+(VTR-VV(N))**2+(XVE(N)-ALT)/D
*IV+VW+.5)*VV(N)**2-2.*PBE(MMAX)/RO)
IF(N.EQ.NBID)FDE=D.
GO TO 1332
FDE=RO/2.*.7854+DIV**2+(-ALV/(DIT*(1.-BETA**2)))+(FV/BETA*(VTR-VV(N)
*))+ABS(VTR-VV(N))+FN*VTR+ABS(VTR))*(2.-BETA**2)+(DE-DN)*(VTR-VV(N)
**2)
IF(N.EQ.15A1)GO TO 165
GO TO 32
ICD1=ICD1+1
TER1=TER1+MN
FD(ICD1)=FDE
FDM=FDM+FDE
FDM=(FDM-FD(NBID))/2.*DT/TIMEE2(NPE4)
WRITE(3,83)K
FORMAT(1H1.4BN,'PASSEGEN DO TREM (',12,')')
WRITE(3,87)(FD(I),I=1,ICD1)
FORMAT(1H1.3BN,'FORÇA DE ARRASTO DO TREM (N) * TEMPO (SE
*G)',7777,(1BF12.4),777)
WRITE(3,88)FDM
FORMAT(777.4BN,'FORÇA DE ARRASTO MEDIA =',F12.4)
ND=4
N=ICD1
M=2
DO 22 I=1,N
PL1(I)=FLOAT((1-I)*MN)*DT
IN=I+N
PL1(IN)=FD(I)
CALL PLOT(ND,PL1,N,M,NL,NB,IF1)
IPRIN=1052
NBID1=NBID+1
DO 15 N=NBID1,NYDTL
T=(FLOAT(N)-1.)*DN
M=1
VE=(VIE(N)-TEI)*R+(VIE(N)-VIE(N+1))/(1.-TETA*(VIE(N)-VIE(N+1)))
PE=PIE(N)+TETA*(VE-R)*(PIE(N)-PIE(N+1))
PIE1=PIE(N)
PIE(N)=PEENT+.55*RD*VE**2
RETE=ABS(VE)*.117/BN1
INIBETD(461.461.465)
FTB=.8.
GO TO 462
FTD=FT
VIE1=VIE(N)
VIE(N)=VE+L./RD*R+(PIE(N)-PE)-FTB/(2.*DIT)*DT*VE*(ABS(VE)
DIE=VIE1)/2.
IF(N.EQ.1501)GO TO 467
GO TO 468
ICD2=ICD2+1
FIC1(122)=FIE 42
FIC(122)=VIE1N.
DO 13 I=1,IKK12
VE=(VIE(N)-TETA*(VIE(N)-VIE1)/.11)+TETA*(VIE(N)-VIE1)
PE=PIE(N)-TETA*(VE+R)*(PIE(N)-PIE1)
PIE(N)=PIE(N)-TETA*(VIE(N)-VIE1)/.11+.1. TETA*(VIE(N)-VIE(N+1))/2
PE=PIE(N)+TETA*(VE+R)*(PIE(N)-PIE(N+1))
RETE=ABS(VE)*.117/BN1
INIBETD(11.111.117)
FTB=.
GO TO 512
FTD=FT
RETE=ABS(VE)*.117/BN1
INIBETD(11.111.117)

```

```

2 FTG=FT
3 V1E1=V1E(M)
  V1E(M)=.50*(VR+VS+1./((RO+R)*(PR-PS)-DT/(2.*DIT))*(FTR+VR*ABS(VR)+FT
+5*VS*ABS(VS)))
  P1E1=P1E(M)
  P1E(M)=.50*(PR+PS+RO*R*(VR-VS)-RO*R*DT/(2.*DIT)*(FTR+VR*ABS(VR)-FT
+5*VS*ABS(VS)))
  Q1E=Q1E+V1E(M)
  IF(N.EQ.1TDI)GO TO 169
  GO TO 13
9 P1E(M,ICD2)=P1E(M)
  V1E(M,ICD2)=V1E(M)
3 CONTINUE
  N=MED
  VR=(V1E(M)-TETR*A*(V1E(M)-V1E1))/((1.+TETR*(V1E(M)-V1E1))
  PR=P1E(M)-TETR*(VR+R)*(P1E(M)-P1E1)
  RETR=ABS(VR)*DIT/RNI
  IF(RETR)531,531,532
1 FTR=0.
  GO TO 533
2 FTR=FT
3 C1=VR+PR/(RO+R)-FTR*DT/(2.*DIT)*VR*ABS(VR)
  C1L=-1./((RO+R)
  VS=(V2E(M)-TETR*A*(V2E(M)-V2E(M+1)))/((1.-TETR*(V2E(M)-V2E(M+1)))
  PS=P2E(M)+TETR*(VS-R)*(P2E(M)-P2E(M+1))
  RETS=ABS(VS)*DIT/RNI
  IF(RETS)551,551,552
1 FT5=0.
  GO TO 553
2 FT5=FT
3 C2=VS+PS/(RO+R)-FT5/(2.*DIT)*DT*VS*ABS(VS)
  C2L=-1.*C1L
  C12=1.571*DIT*(C1-C2)/R4*(C1-C2)
  C12L=1.571*DIT*(C1-C2)/R4*(C1L-C2L)
  RE4=ABS(C12)*DIT/RNI
  IF(RE4)90,90,91
3 RE4=0.
  GO TO 92
1 IF(RE4.GT.2200)GO TO 1122
  RE4=64./RE4
  GO TO 92
2 RE4=1.325474/(ALOG(3.51/(RE4*SRRT(FIP0))+RRP0/3.3))**2
3 IF(XVF.EQ.0)GO TO 1755
  IF(R4E.LI.DEC(1).OR.R4E.GT.DEC(NPR1))GO TO 144
  GO 93 1=1,NPR11
  IF(R4E.LI.DEC(1+1))GO TO 94
3 CONTINUE
1 U1=C12L*(RO+R4)/R1E4/((C12L+R4**2+R4*(C1,3)))/(C12L+R4**2+R4*(C1,3))
  UR=C1L*(R4*(C1,3))/(C12L+R4**2+R4*(C1,3))
  UT=C12L*(C1,1)-(RPM50)-C12L*(C12L+R4**2+R4*(C1,3))
  UR4C=UR*U1**2/3
  UR4C=9.*U1*UR4C**2+UR4C.*U1**2/27.
  UR4C=UR4C+UR**2/27.
  IF(UR4C.LI.0)GO TO 144
3 D1E1=V1E(NRTCUR+221)*R-UR4C*2700
  IF(NB.GT.0)XETRV=-1+XETRV
  STEPV=STEPV1.-STEPV*443
  XETRV=XETRV-XETRV
  XETRV=ATANH(XETRV)
  GO 912 1,1E
  USE=2.*XETRV*UR4C**2+XETRV*UR4C**2+XETRV*UR4C**2+XETRV*UR4C**2

```

```

IF(Q4E, GE, QE(1), AND, Q4E, LE, QE(NPE1))GO TO 184
2 CONTINUE
GO TO 184
3 V4E=-2. *SQRT(-UB/3.)-U1/3.
IF(UB, LT, 0.)V4E=-1. *V4E
Q4E=V4E+A4
IF(Q4E, GE, QE(1), AND, Q4E, LE, QE(NPE1))GO TO 184
V4E=SQRT(-UB/3.)-U1/3.
IF(UB, LT, 0.)V4E=-1. *V4E
Q4E=V4E*A4
GO TO 184
5 US=(-UB/2. +SQRT(UD))**.333333
UT=(-UB/2. -SQRT(UD))**.333333
V4E=US+UT-U1/3.
Q4E=V4E*A4
4 P1E(M)=(V4E-C12)/C12L
GO TO 1567
6 P1E(M)=RD*F4*ALB4/(2. *DIH4)*(C12+C12L*P1E(M))*AB5(C12+C12L*P1E(M)
*)
V4E=C12+C12L*P1E(M)
Q4E=V4E*A4
7 P2E1=P2E(M)
P2E(M)=P1E(M)
V1E(M)=C1+C1L*P1E(M)
V2E1=V2E(M)
V2E(M)=C2+C2L*P2E(M)
Q1E=D. 141516*BIT**2*DM/(2. *RLT)*(Q1E+V1E(M)/2.)
Q2E=V2E(M)/2.
Q1MCCK)=Q1MCCK)+Q1E
Q4MCCK)=Q4MCCK)+Q4E
IF(N, EQ, 1707)GO TO 170
GO TO 171
8 P1(M, 1002)=P1E(M)
V1(M, 1002)=V1E(M)
P2(M, 1002)=P2E(M)
V2(M, 1002)=V2E(M)
A4(1002)=Q4E
Q1(1002)=Q1E
GO TO 184 N=NNED2, NNRI
VR=(V2E(M)-TETR+A*(V2E(M)-V2E1))/C1. +TETR*(V2E(M)-V2E1)
PR=P2E(M)-TETR*(VR+A*(P2E(M)-P1E1)
VS=(V2E(M)-TETR+A*(V2E(M)-V2E(M+1)))/C1 -TETR*(V2E(M)-V2E(M+1))
PD=P2E(M)+TETR*(VR-A*(P2E(M)-P2E(M+1))
RETR=AB5(VR)*BIT/ANI
IF(RES, 061, 062, 063
FIN=D.
GO TO 068
FIN=PI
ANI=AB5(VR)*BIT/ANI
IF(RES, 071, 072, 073
FIN=D.
GO TO 078
FIN=PI
ANI=VR*CO
COCK)= CO*(VR+AB5(VR)+HI*(PR-PS)-DT/12. *BIT) +TETR*(VR+AB5(VR)-PI
+D*(VR+AB5(VR))
P2E1=VR
P1E1=D*(VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT) +TETR*(VR+AB5(VR)-PI
+D*(VR+AB5(VR))
Q2E=VR-VRECK
P1=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P2=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P3=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P4=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P5=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P6=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P7=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P8=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P9=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P10=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P11=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P12=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P13=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P14=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P15=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P16=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P17=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P18=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P19=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P20=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P21=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P22=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P23=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P24=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P25=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P26=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P27=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P28=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P29=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P30=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P31=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P32=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P33=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P34=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P35=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P36=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P37=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P38=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P39=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P40=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P41=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P42=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P43=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P44=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P45=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P46=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P47=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P48=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P49=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P50=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P51=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P52=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P53=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P54=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P55=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P56=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P57=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P58=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P59=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P60=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P61=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P62=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P63=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P64=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P65=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P66=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P67=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P68=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P69=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P70=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P71=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P72=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P73=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P74=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P75=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P76=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P77=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P78=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P79=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P80=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P81=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P82=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P83=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P84=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P85=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P86=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P87=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P88=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P89=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P90=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P91=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P92=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P93=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P94=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P95=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P96=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P97=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P98=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P99=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT
P100=VR+AB5(VR)+HI*(VR-VS)-RL+R-DT/12. *BIT

```

[illegible]

```
PR=PBE(M)-TETA*(VR+R)*(PBE(M)-PBE1)
RETR=ABS(VR)+DIT/RNI
IF(RETR>110,110,111)
FTR=0
GO TO 112
FTR=FT
IF(VBE(M).GE.D.)GO TO 175
PBE(M)=PDEXT-.85*RO*VR+.2
GO TO 177
PBE(M)=PDEXT
VBE(M)=VR-1./(RO+R)*(PBE(M)-PR)-FTR*DT/(2.+DIT)*VR*ABS(VR)
BSE=.7854*DIT+.2+DX/(FLOAT(NRA)+DX)*(QBE+VBE(M)/2.)
IF(K.E2.ITOT)GO TO 170
GO TO 15
PBE(M,ICOR2)=PBE(M)
VBE(M,ICOR2)=VBE(M)
QBE(ICOR2)=QBE
ITOT=ITOT-MNTOT
QBND(K)=QBND(K)+QBE
B1ND(K)=DT/DTTDT*(QBND(K)-Q1(ICOR2)/2.)
B2ND(K)=DT/DTTDT*(QBND(K)-Q2(ICOR2)/2.)
B3ND(K)=DT/DTTDT*(QBND(K)-Q3(ICOR2)/2.)
B4ND(K)=DT/DTTDT*(QBND(K)-Q4(ICOR2)/2.)
B5ND(K)=DT/DTTDT*(QBND(K)-Q5(ICOR2)/2.)
WRITE(3,113)(Q1(I),I=1,ICOR2)
FORMAT(1H1,3X,5HYPERB DO RR NO TRECNO 1 (M+3/SEG) * TE
+MPO (SEG),7777,(10F12.4),77)
WRITE(3,114)QBND(K)
FORMAT(7777,3X,5HYPERB MEDIA DO RR NO TRECNO 1 =,F12.4,1
+QH (M+3/SEG),77777)
NO=5
N=ICOR2
M=0
NL=N
DO 115 I=1,M
PL1(I)=FLOAT((I-1)*MNTOT)+DT
IN=I+N
PL1(IN)=Q1(I)
CALL PLOT(NC,PL1,N,M,NL,NS,IF1)
WRITE(3,115)(Q1(I),I=1,ICOR2)
FORMAT(1H1,3X,5HYPERB DO RR NO TRECNO 2 (M+3/SEG) * TE
+MPO (SEG),7777,(10F12.4),77)
WRITE(3,117)QBND(K)
FORMAT(7777,3X,5HYPERB MEDIA DO RR NO TRECNO 2 =,F12.4,1
+QH (M+3/SEG),77777)
NO=5
DO 115 I=1,M
IN=I+N
PL1(IN)=Q1(I)
CALL PLOT(NC,PL1,N,M,NL,NS,IF1)
WRITE(3,118)(Q1(I),I=1,ICOR2)
FORMAT(1H1,3X,5HYPERB DO RR NO TRECNO 3 (M+3/SEG) * TE
+MPO (SEG),7777,(10F12.4),77)
WRITE(3,120)QBND(K)
FORMAT(7777,3X,5HYPERB MEDIA DO RR NO TRECNO 3 =,F12.4,1
+QH (M+3/SEG),77777)
NO=7
DO 121 I=1,M
IN=I+N
PL1(IN)=Q1(I)
CALL PLOT(NC,PL1,N,M,NL,NS,IF1)
WRITE(3,122)(Q1(I),I=1,ICOR2)
FORMAT(1H1,3X,5HYPERB DO RR NO TRECNO 4 (M+3/SEG) * TE
+MPO (SEG),7777,(10F12.4),77)
WRITE(3,124)QBND(K)
```

```

FORMAT(////, 33X, 33HVZRD MEDIA DO AR NO TRECHO 4 =, F12.4, 1
*3H (M**3/5EG), ////)
ND=8
DO 124 I=1, N
IN=I+N
PL1(IN)=B4(I)
CALL PLOT(ND, PL1, N, M, NL, N5, IF1)
WRITE(3, 125) (B5(I), I=1, IC02)
FORMAT(14H, 33X, 33HVZRD DO AR NO TRECHO 5 (M**3/5EG) * TE
*3H (5EG), ////, (18F12.4), //)
WRITE(2, 126) B5M(K)
FORMAT(////, 33X, 33HVZRD MEDIA DO AR NO TRECHO 5 =, F12.4, 1
*3H (M**3/5EG), ////)
IF (KPR.EQ.8) GO TO 1414
ND=9
DO 127 I=1, N
IN=I+N
PL1(IN)=B5(I)
CALL PLOT(ND, PL1, N, M, NL, N5, IF1)
KK=8
NN18=(1PRIM-1)/18
DO 128 I=1, 1PRIM, NN18
T=ELORT((I-1)*NNTOT)*DT
WRITE(3, 128) T, (V1(J, I), J=1, NNED), (V2(J, I), J=NNED, NNR), (V3(J, I), J=M
*AR, NNRN)
FORMAT(////, 18X, 33HVELOCIDADE DO AR NO TUNEL (M/SEG) * DI
*ETRUCIA (X) PARR T =, F9.4, 6H (5EG), ////, (18F12.4), //)
ND=ND+1
N=NNRN
NL=N
DO 129 J=1, NNED
PL2(J)=(ELORT(J)-1.)*DX
IN=J+N
PL2(IN)=V1(J, I)
DO 130 J=NNED2, NNR
PL2(J)=(ELORT(J)-1.)*DX
IN=J+N
PL2(IN)=V2(J, I)
DO 131 J=NNR2, NNRN
PL2(J)=(ELORT(J)-1.)*DX
IN=J+N
PL2(IN)=V3(J, I)
CALL PLOT(ND, PL2, N, M, NL, N5, IF1)
WRITE(3, 132) T, (P1(J, I), J=1, NNED), (P2(J, I), J=NNED2, NNR), (P3(J, I), J=
*NR2, NNRN)
FORMAT(////, 18X, 33HCOMPRESS DO AR NO TUNEL (M/M**3) * DIET
*RUCIA (X) PARR T =, F9.4, 6H (5EG), ////, (18F12.4), //)
ND=ND+1
N=NNRN
NL=N
DO 133 J=1, NNED
PL3(J)=(ELORT(J)-1.)*DX
IN=J+N
PL3(IN)=P1(J, I)
DO 134 J=NNED2, NNR
PL3(J)=(ELORT(J)-1.)*DX
IN=J+N
PL3(IN)=P2(J, I)
DO 135 J=NNR2, NNRN
PL3(J)=(ELORT(J)-1.)*DX
IN=J+N
PL3(IN)=P3(J, I)
CALL PLOT(ND, PL3, N, M, NL, N5, IF1)
LEAVE, EL1000 TO 130
CONTINUE

```

```

00NNRY=(ICD2-IPRIM-1)/5
I=IFRIM
I=I+NNHNSV
IF(I-ICD2)137,137,1844
DD 139 M=1,MMD
V1(M,1)=V1(M,ICD2)
V1E(M)=V1(M,1)
P1(M,1)=P1(M,ICD2)
P1E(M)=P1(M,1)
DD 140 M=MMD,MRR
V2(M,1)=V2(M,ICD2)
V2E(M)=V2(M,1)
P2(M,1)=P2(M,ICD2)
P2E(M)=P2(M,1)
DD 141 M=MRR,MNAN
V3(M,1)=V3(M,ICD2)
V3E(M)=V3(M,1)
P3(M,1)=P3(M,ICD2)
P3E(M)=P3(M,1)
R1(1)=R1(ICD2)
R2(1)=R2(ICD2)
R3(1)=R3(ICD2)
R4(1)=R4(ICD2)
R5(1)=R5(ICD2)
Q1M=Q1M+Q1MCK(K)
Q2M=Q2M+Q2MCK(K)
Q3M=Q3M+Q3MCK(K)
Q4M=Q4M+Q4MCK(K)
Q5M=Q5M+Q5MCK(K)
IF(NPT.EQ.1)GO TO 1875
QAM=1./FLDT(NPT-1)*(Q1M-(Q1MC(1)+Q1MC(NPT))/2.)
QBM=1./FLDT(NPT-1)*(Q2M-(Q2MC(1)+Q2MC(NPT))/2.)
QCM=1./FLDT(NPT-1)*(Q3M-(Q3MC(1)+Q3MC(NPT))/2.)
QDM=1./FLDT(NPT-1)*(Q4M-(Q4MC(1)+Q4MC(NPT))/2.)
QEM=1./FLDT(NPT-1)*(Q5M-(Q5MC(1)+Q5MC(NPT))/2.)
WRITE(3,143)Q1M,Q2M,Q3M,Q4M,Q5M
FORMAT('','','','X,11PHVREDES MEDIAS DO AR (M**3/SEG) NOS TRECHO
'1,2,3,4 E 5 RESPECTIVAMENTE, PARA O INTERVALO DE TEMPO EM, E
BTUDO,'','',',5F12.4,'')
GO TO 150
PRITE(3,160)K,T
FORMAT(1H1,4X,'PSSERDEN DO TREN ','12,','/',,4X,'TEMPO =',F9.
4,' SEG',,/,4X,'DE VENTILADORES CRIAR NR FAIXA DE INSTABIL
100DE',,')
CONTINUE
END

```

[illegible][illegible]

```

IF(XIES.LT.W.OR.XIWS.GT.W)GO TO 34
TIES=(XIES-X)/((V5-A)+T
TIMS=(XIWS-X)/((V5-A)+T
AKWS=1.
IF(ABS(VV(N))-ABS(V5))B32,B32,B31.
AKES=Y+((VV(N)-V5)/VV(N))*Z
GO TO 325
IF(V5)B32,B32,B34
AKES=Y+((V5-VV(N))/V5)*+Z
GO TO 325
AKES=-1.
AKWS=-Y+((V5-VV(N))/V5)*+Z
IF(XIES.LE.W)AKSIES=1.
IF(XIWS.GE.W)AKSIWS=1.
IF(XIES.LE.W.AND.XIWS.LT.W)GO TO 38
IF(XIES.LE.W.AND.XIWS.GE.W)GO TO 31
IF(XIES.GT.W.AND.XIWS.LT.W)GO TO 32
IF(XIES.GT.W.AND.XIWS.GE.W)GO TO 33
DTIRS=T-TIES
VSTR=(V5-VV(N))/(1.-BETA**2)+VV(N)
GO TO 192
DTIRS=TIMS-TIES
VSTR=(V5-VV(N))/(1.-BETA**2)+VV(N)
GO TO 192
DTIRS=DT
VSTR=V5
GO TO 193
DTIRS=TIMS-T+DT
VSTR=V5
VD=(VSTR-VV(N))*(1.-BETA**2)+VV(N)
IF(VSTR.EQ.0.)GO TO 195
REWS=ABS(VSTR)*(DIT-DIV)/ANI
IF(REWS.GT.2000.)GO TO 1111
FWS=64./REWS
GO TO 195
FXT=1.225474/(ALOG(2.51/(REWS+SQRT(FITS))+RTIR/3.0))*+2
REVS=ABS(VSTR-VV(N))*(DIT-DIV)/ANI
IF(REVS.EQ.0.)GO TO 34
IF(REVS.GT.2000.)GO TO 1112
FVS=64./REVS
GO TO 34
FVD=1.225474/(ALOG(2.51/(REVS+SQRT(FITS))+RTIR/3.0))*+2
IF(V5.EQ.0.)GO TO 320
FTS=FT
RETURN
END

```

[illegible][illegible]
$$\begin{aligned} \mathbf{y}_1 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_4 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_5 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_6 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{y}_7 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_8 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_9 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_{10} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_{11} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_{12} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$
[illegible][illegible]

Y	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

[illegible]

$\bar{r} = \frac{\sum_{j=1}^n r_j}{n}$

[illegible][illegible]
$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4} \quad \frac{1}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{8} \quad \frac{1}{8} = \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{16}$$

$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{\alpha}{\rho_0^2}$

$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n o_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n n_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n m_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n j_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n i_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n h_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n f_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j$
$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n o_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n n_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n m_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n j_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n i_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n h_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n f_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j$

$XINR = X - (XVE(N) - X - ALV) / ((CVR + A) + DT - XVE(N) + XVE(N-1)) * (CVR + A) + DT$

$XR = X - (CVR + A) * DT$

IF(XIER. LT. XR. OR. XINR. GT. X) GO TO 39

$TIER = (XIER - X) / (CVR + A) + T$

$TINR = (XINR - X) / (CVR + A) + T$

AKNR=1.

IF(ABS(VV(N)) - ABS(VR)) 432, 432, 434

AKER=Y+((VV(N)-VR)/VV(N))*Z

GO TO 425

IF(VR) 433, 433, 434

AKER=Y+((VR-VV(N))/VR)**Z

GO TO 425

AKER=1.

AKER=-Y+((VR-VV(N))/VR)**Z

IF(XIER. LE. X) AKSIER=1.

IF(XINR. GE. XR) AKSINR=1.

IF(XIER. LE. X. AND. XINR. LT. XR) GO TO 35

IF(XIER. LE. X. AND. XINR. GE. XR) GO TO 36

IF(XIER. GT. X. AND. XINR. LT. XR) GO TO 37

IF(XIER. GT. X. AND. XINR. GE. XR) GO TO 38

DTTR=TIER-T+DT

VRTR=VR

$VE = (VRTR - VV(N)) * (1. - BETR**2) + VV(N)$

GO TO 522

DTTR=TIER-TINR

$VRTR = (VR - VV(N)) / (1. - BETR**2) + VV(N)$

GO TO 513

DTTR=DT

VRTR=VR

GO TO 522

DTTR=T-TINR

$VRTR = (VR - VV(N)) / (1. - BETR**2) + VV(N)$

IF(VRTR. EQ. 0.) GO TO 523

RENR=ABS(VRTR)*(DIT-DIV)/ANI

IF(REN. GT. 2300.) GO TO 1113

RNR=64./RENR

GO TO 523

$RNR = 1.225474 / (\text{ALOG}(2.51 / (\text{RENR} + \text{SQRT}(\text{FITR})) + \text{RRTR} / 3.3))**2$

$REVR = \text{ABS}(VRTR - VV(N)) * (DIT - DIV) / \text{ANI}$

IF(REVR. EQ. 0.) GO TO 39

IF(REVR. GT. 2300.) GO TO 1114

RVR=64./REVR

GO TO 39

$RVR = 1.225474 / (\text{ALOG}(2.51 / (\text{REVR} + \text{SQRT}(\text{FITR})) + \text{RRTR} / 3.3))**2$

IF(VR. EQ. 0.) GO TO 600

FTV=FT

RETURN

END

SUBROUTINA DE INTERPOLACAO POLINOMIAL ATRAVES DO METODO DOS MINIMOS QUADRADOS COM RESTRICOES

SUBROUTINE SUBINT(NPE, N3, NP, X, Y, COEFF)

IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)

DIMENSION N(9), N(20), Y(20), IP(5), A(20, 20), B(20), COEFF(2, 4)

NPE = NUMERO DE PONTOS EXTREMOS

N(1) = COORDENADAS DOS PONTOS EXTREMOS

N(2) = ALGUEM DE 1000

N(3) = ARBITRARIO DOS DADOS

Y(1) = COORDENADAS DOS DADOS

ALL N(10)

DO 1 1-1, NPE

N(10) = N(10) - N(1)

DO 2 1-1, NP

N(10) = N(10) - N(1)

```

NI=NPE-1
I=1
IP(1)=8
J=1
XP=XJ(I+1)
L=J
DO 148 J=L,NP
IF(X(J)-XP) 148,148,135
I=I+1
IP(1)=J-1
GO TO 125
CONTINUE
IF(NPE)=NP
NF=NI-3
DO 155 I=1,NF
B(I)=8.
DO 155 J=1,NF
R(I,J)=8.
DO 288 I=1,NI
K=4*(I-1)
DO 288 J=1,4
L=K+J
DO 288 N=J,4
M=K+N
I1=IP(1)+1
I2=IP(1+1)
DO 168 I3=I1,I2
R(L,M)=R(L,M)+2.*(X(IJ)-XJ(1))**(N+J-2)
R(M,L)=R(L,M)
CONTINUE
KE=4*NI
NE=NI-1
DO 258 I=1,NE
L=KE+(I-1)*3+1
N=4*(I-1)
DO 258 K=1,2
DO 218 N=1,4
NJ=N+N+(K-1)*4
R(L,NJ)=(XJ(I+1)-XJ(1))**(N-1)
R(L,NJ)=R(L,NJ)*(-1)**(K+1)
R(NJ,L)=R(L,NJ)
DO 228 N=2,4
NJ=N+N+(K-1)*4
R(L+1,NJ)=(N-1)*(XJ(I+1)-XJ(1))**(N-2)
R(L+1,NJ)=R(L+1,NJ)*(-1)**(K+1)
R(NJ,L+1)=R(L+1,NJ)
DO 238 N=3,4
NJ=N+N+(K-1)*4
R(L+2,NJ)=(N-1)*(N-2)*(XJ(I+1)-XJ(1))**(N-3)
R(L+2,NJ)=R(L+2,NJ)*(-1)**(K+1)
R(NJ,L+2)=R(L+2,NJ)
CONTINUE
DO 388 I=1,NI
L=(I-1)*4
DO 388 J=1,4
M=L+J
I1=IP(1)+1
I2=IP(1+1)
DO 298 N=I1,I2
B(I)=B(M)+Y(N)+2.*(X(N)-XJ(1))**(J-1)
CALL SOLVE (A,B,NP)
DO 358 I=1,NI
L=(I-1)*4
DO 358 J=1,4
M=L+J
DEFP(1,0)=B(M)

```

```

DD 351 I=1,NI
CDEFP(I,1)=CDEFP(I,1)-CDEFP(I,2)*XJ1+CDEFP(I,3)*XJ1**2-CDEFP(I
,4)*XJ1**3
CDEFP(I,2)=CDEFP(I,2)-2.*CDEFP(I,3)*XJ1+3.*CDEFP(I,4)*XJ1**2
CDEFP(I,3)=CDEFP(I,3)-3.*CDEFP(I,4)*XJ1
CDEFP(I,4)=CDEFP(I,4)
DD 3 I=1,NPE
XJ(I)=XJ(I)+XJ1
DD 4 I=1,NP
X(I)=X(I)+XJ1
RETURN
END

```

SUBROUTINE SOLVE (A,X,N)

SOLUTION OF N SIMULTANEOUS LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS

A IS THE INPUT ARRAY X IS THE RIGHT HAND SIDE OF THE EQUATION
 AX=C ON INPUT ON OUTPUT THE ARRAY X CONTAINS THE ANSWERS, X N IS
 THE NUMBER OF EQUATIONS
 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
 DIMENSION A(50,50),X(50)
 CONSTRUCT THE TRIANGULAR ARRAY

```

MM1=N-1
DD 50 K=1,MM1
    NORMALIZE EACH ROW ON ITS MAXIMUM MODULUS ELEMENT

```

```

M=N-K+1
DD 2 I=1,M
D=B.0
DD 4 J=1,M
CX=DAABS(A(I,J))
IF(CX-D)4,4,3
C=CX
CONTINUE
D=1.0DB/C
X(I)=X(I)*D
DD 7 J=1,M
A(I,J)=A(I,J)*D
CONTINUE

```

FIND THE OPTIMUM PIVOT ROW

```

D=B.0
DD 12 I=1,M
CX=DAABS(A(I,M))
IF(CX-D)12,12,12
D=CX
IP=I
CONTINUE

```

STORE THE PIVOT ROW

```

IF(CD)18,18,18
IF(CIP-N)14,20,20
DD 15 J=1,M
E=A(IP,J)
A(IP,J)=A(KM,J)
A(KM,J)=E
E=A(IP)
X(IP)=X(KM)
X(KM)=E

```

ELIMINATE THE KTH ELEMENTS

```

C MM1=M-1

```

```
DO 30 I=1,MM1
E=A(I,M)/A(M,M)
X(I)=X(I)-E*X(M)
DO 30 J=1,MM1
A(I,J)=A(I,J)-E*A(M,J)
CONTINUE
```

CARRY OUT THE BACK SOLUTION

```
C=DABS(A(1,1))
IF(C)70,70,54
X(1)=X(1)/A(1,1)
DO 50 I=2,N
IM1=I-1
E=X(I)
DO 57 J=1,IM1
E=E-A(I,J)*X(J)
X(I)=E/A(1,1)
RETURN
WRITE(3,75)
FORMAT (22H05OLVE SYSTEM SINGULAR)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE PLOT(NO,PL,N,M,NL,N5,IFI)
NO=NUMERO DO GRAFICO
N=NUMERO DE PONTOS
M=NUMERO DE CURVAS A TRACAR + 1
PL=VETOR DE PLOTAGEM COM N*M COMPONENTES
N5=0 SE AS ABCISSAS ESTIVEREM EM ORDEN CRESCENTE
NL=NUMERO DE LINHAS USADAS COMO FUNDO DE ESCALA PARA AS ABCISSAS
(RECOMENDA SE TOMAR NL = N)
IFI=NUMERO DA FILE A SER IMPRESSO
```

```
DIMENSION OUT(101),YPR(11),ANG(9),PL(1)
DATA BLANK/' ',ANG/'+', 'S', 'X', 'Y', 'Z', '1', 'M', 'N'
FORMAT(1H1,50X,7H CHART ,13,77)
FORMAT(1H ,F11.4,5X,101R1)
FORMAT(1H )
FORMAT(1H ,14X,77)
```

```
FORMAT(1H2,9X,11F10.4)
NLL=NL
IF(N5)16,16,10
CLASSIFICADOR DAS ABCISSAS POR ORDEN CRESCENTE
DO 10 I=1,N
DO 14 J=1,N
IF(PL(I)-PL(J))14,14,11
L=I-M
LL=J-N
```

```
          MUOVENDA COMPLETA      A(1).....A(9)
DO 12 K=1,8
L=L+K
LL=LL+K
F=PL(L)
PL(L)=PL(LL)
PL(LL)=F
CONTINUE
CONTINUE
```

```
          TESTE NLL
IF(NLL)20,10,20
NLL=20
*****IMPRESSAO DO TITULO
WRITE(1F1,1)NO
*****FATOR DE ESCALA DAS ABCISSAS*****
XSCALE=(PL(N)-PL(1))/PLONT(NLL-1)
```

```

*****YMIN,YMAX,FATOR DE ESCALA DAS ORDENADAS*****
M1=M+1
YMIN=PL(M1)
YMAX=YMIN
M2=M+N
DO 40 J=M1,M2
IF(PL(J)-YMIN)28,26,26
IF(PL(J)-YMAX)40,40,38
YMIN=PL(J)
DO TO 40
YMAX=PL(J)
CONTINUE
***** FATOR DE ESCALA DAS ORDENADAS
YSCAL=(YMAX-YMIN)/100.
XB=PL(1)
L=1
****'MY' NUMERO DE CURVAS A PLOTAR *****
MY=M-1
IF(YSCAL.NE.0.) GO TO 42
WRITE(1F1,41)MY,YMAX
FORMAT(2X,11,'CONSTANTE DE CURVA = ',F10.4)
RETURN
I=1
F=1-1
XPR=XB+F*YSCAL
IF(PL(L)-XPR)50,50,70
DO 55 IX=1,101
OUT(IX)=BLANK
DO 60 J=1,MY
LL=L+J+N
***** NUMERO DE COLONIA -- ORDENAR ARRAY *****
JP=((PL(LL)-YMIN)/YSCAL)+1.
OUT(JP)=AND(J)
CONTINUE
WRITE(1F1,2)XPR,(OUT(IX),IX=1,101)
L=L+1
DO TO 60
WRITE(1F1,3)
I=I+1
IF(I-NLL)45,84,86
XPR=PL(N)
DO TO 50
WRITE(1F1,7)
YPR(1)=YMIN
***** IMPRESSAO DA ESCALA DAS ORDENADAS *****
DO 60 KN=1,9
YPR(KN+1)=YPR(KN)+YSCAL*10.
YPR(11)=YMAX
WRITE(1F1,8)(YPR(IP),IP=1,11)
RETURN
END

```

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido a complexidade do fenômeno, refletido pelo número elevado de parâmetros básicos, torna-se impraticável um estudo genérico e completo sobre a influência de cada um destes parâmetros, apresentando os resultados na forma bastante conveniente de gráficos, tabelas e abacos. Alguns estudos neste estilo, bem pouco abrangentes, foram mencionados na referência bibliográfica. O maior mérito destes trabalhos foi possibilitarem uma visão qualitativa de alguns efeitos isolados, já que os resultados ficaram restritos a uma faixa de variação bem estreita.

Indicações razoavelmente completas e precisas só são possíveis aplicando-se diretamente o modelo de simulação a cada problema específico. Segundo este ponto de vista, foi escolhido um trecho em couraça da linha Norte-Sul do Metrô de São Paulo para ilustrar a utilização do modelo. A escolha recaiu arbitrariamente no túnel entre as estações da Luz e São Bento, no sentido da primeira para segunda. Este trecho não possui o poço de alívio no fim do túnel, conforme indicado na figura 1, mas sim no início da estação correspondente (a escolha entre uma destas opções usuais para a localização do poço depende, fundamentalmente, das limitações construtivas). Os dados utilizados no programa são apresentados a seguir.

Características do fluido (ar):

Temperatura média do ar no túnel: $T_m = 298 \text{ K}$

Relação de calores específicos: $\frac{c_p}{c_v} = 1,4$

Constante do ar: $R = 29,2645 \frac{\text{mKgf}}{\text{kgm K}}$

Densidade: $\rho = 1,07 \text{ kg/m}^3$

Viscosidade: cinemática: $\nu = 15,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg.}$

Características geométricas e de perda de carga

Diâmetro do veículo: $D_v = 3\text{m}$

Comprimento do veículo: $L_v = 120\text{m}$

Diâmetro do túnel: $D_t = 5\text{m}$

Comprimento do túnel: $L_t = 740\text{m}$

Diâmetro hidráulico da saída de exaustão: $D_{h4} = 4,7\text{m}$

Área transversal ao escoamento na saída de exaustão:

$$A_4 = 28,8\text{m}^2$$

Comprimento equivalente dos dutos de exaustão:

$$L_{eq,4} = 1500\text{m}$$

Diâmetro hidráulico do poço de alívio: $D_{h5} = 5,4\text{m}$

Área transversal ao escoamento no poço de alívio:

$$A_5 = 30\text{m}^2$$

Comprimento equivalente dos dutos do poço: $L_{eq,5} = 1300\text{m}$

Perda de carga no insonorizador: $\Delta p_{inso} = 98,1 \text{ N/m}^2$

Indicador da posição do poço de alívio no túnel:

$$n_{aa} = 1 \quad (L_{aa} = n_{aa} \Delta x)$$

(Na simulação dos efeitos do poço de alívio, ele foi re-locado para o penúltimo ponto da malha).

Incrementos

Incremento ao longo do túnel: $\Delta x = 10\text{m}$

Passo no tempo: $\Delta t = 0,025 \text{ seg.}$

(Os valores acima satisfazem a condição de convergência e estabilidade da solução numérica).

Dados experimentais

Coeficiente multiplicativo da fórmula de perda de carga por contração do fluxo na frente, ou traseira, do veículo: $y = 3.$

Expoente da fórmula de perda de carga por contração do fluxo na frente, ou traseira do veículo: $Z = 0,5.$

(Os valores acima foram obtidos por extrapolação gráfica na tabela do apêndice)

Rugosidade relativa na região anular entre o trem e o túnel: $RRTR = 0,003$

Rugosidade relativa na saída de exaustão e poço de alívio: $RRPO = 0,00005$

Coefficiente de atrito na parede do túnel, na região "distante" do veículo: $FT = 0,125$

Coefficiente de atrito assumido como referência na fórmula de Colebrook-white, em relação a região anular entre o trem e o túnel: $FITR = 0,025$

Coefficiente de atrito assumido como referência na fórmula de colebrook-white, em relação a saída de exaustão e o poço de alívio: $FIPO = 0,01$

(Neste caso, a melhoria do grau de precisão dos resultados, pela resolução interativa da fórmula de colebrook-white, não compensa o aumento do tempo de execução do programa).

Intervalo de tempo entre a passagem de dois trens consecutivos: $HWAY = 180 \text{ seg.}$

Número de períodos no tempo a serem analisados: $NPT = 1$

(Como, resta aplicação, as condições iniciais do meio não diferem substancialmente para os trens consecutivos, a simulação se restringirá ao primeiro período).

Indicador da existência de poço de alívio no túnel:
$$\begin{cases} KPA = 0 & \text{quando não existe poço de alívio} \\ KPA \neq 0 & \text{quando existe poço de alívio} \end{cases}$$

Indicador da existência de ventilação forçada:
$$\begin{cases} KVF = 0 & \text{quando não existe ventilação forçada} \\ KVF \neq 0 & \text{quando existe ventilação forçada} \end{cases}$$

Vazões devido somente a ventilação forçada

Vazão de projeto que passa pelos ventiladores de exaustão: $Q_{VF} = 244,2 \text{ m}^3/\text{seg.}$

(A saída de exaustão serve a ambos os sentidos da linha).

Vazão de projeto, do início do túnel até a saída de exaustão: $Q_{VF_e} = 61,05 \text{ m}^3/\text{seg.}$

Vazão de projeto, do fim do túnel até a saída de exaustão: $Q_{VF_d} = -61,05 \text{ m}^3/\text{seg.}$

(Foi assumido escoamento simétrico nos dois sentidos da linha, ou seja, $e = 2$ na equação (2.36))

Curva característica dos ventiladores de exaustão: vide

fig. 5.

Curvas de velocidade e posição da frente do trem vs. tempo: vide figs. 7 e 6, respectivamente.

Com a finalidade de ilustrar as potencialidades do programa foram simuladas as quatro situações descritas no item 3.6, apresentando-se os resultados na forma gráfica.

As figuras 8 e 9 representam a distribuição da força de arrasto com o tempo. A ventilação forçada reduz ligeiramente a força de arrasto na primeira metade do túnel, onde o seu efeito é no mesmo sentido do deslocamento do trem, mas aumenta-a, de tal forma, na segunda metade que o efeito líquido é substancialmente positivo, conforme se observa através dos valores médios. A influência do poço de alívio é notória somente durante a passagem do trem por ele, ocorrendo uma pequena redução da força de arrasto.

Conforme expresso pelas figuras 10, 11, 12 e 13, as vazões médias nos trechos 1 e 2 praticamente não são afetados pela presença do poço de alívio. Este reduz sensivelmente os picos da distribuição no trecho 3 quando há somente ventilação natural, alterando, porém, muito pouco o valor médio (fig. 14). Em havendo ventilação forçada obtém-se uma inversão de fluxo, durante a passagem do trem pelo poço, da mesma ordem de grandeza da vazão de

regime, porém, novamente, o valor médio é pouco alterado (fig. 15). A distribuição do fluxo na saída de exaustão (figs. 16 e 17) é razoavelmente simétrica para a ventilação natural mas é fortemente determinada pelas pressões na esteira do trem quando há ventilação forçada, sendo desprezível a influência do poço de alívio em ambos os casos. Quando atua somente a ventilação natural predominam os fluxos de expulsão no poço de alívio (fig. 18) enquanto que a interação com o efeito contrário dos ventiladores inverte este comportamento (fig. 19). O efeito de pistão produz variações notórias em relação às vazões de regime nos diversos trechos do sistema, não ocorrendo, contudo, desvios para fora da faixa de estabilidade da curva característica dos ventiladores.

As distribuições de velocidade e pressão do ar ao longo do túnel para vários instantes no tempo estão ilustradas nas figs. 20 a 55. As figs. 20 a 31 correspondem a situações em que o trem está se movimentando na primeira metade do túnel, verificando-se nelas um claro abrandamento dos picos de pressão devido a ventilação forçada que age no mesmo sentido do deslocamento do trem. As distribuições decorrentes da movimentação do trem na segunda metade do túnel acham-se representadas nas figuras 32 a 43, onde se observam os efeitos marcantes do poço de alívio. Após a saída do trem, as recuperações rápida e lenta das condições iniciais correspondentes à ventilação forçada e natural, estão indicadas, respectivamente, nas figs. 44 a 55. Através deste conjunto de gráficos se tornam claras as marcantes características ondulatórias do fenômeno, cujas dinâmica pode ser acompanhada pela análise simultânea destes resultados com as curvas de velocidade e deslocamento do trem.

É importante frisar que os resultados aqui obtidos, não necessariamente devem coincidir com a situação real em que os dados foram tomados, na medida que não se considerou as condições reais na entrada e saída do túnel. Não foi possível medir-se o efeito da simplificação, já que não existe, praticamente, um registro experimental destes valores no Metrô de São Paulo. (Em toda a literatura consultada, não foram encontrados levantamentos experimentais, suficientemente amplos e precisos, sobre as distribuições estudadas neste trabalho).

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo desenvolvido neste trabalho permite uma simulação detalhada do fenômeno aerodinâmico em túneis de Metrô, tipo couraça, posto que considera sobre:

- (i) todos os parâmetros que, através dos inúmeros estudos realizados neste campo, foram avaliados como agentes principais no comportamento do sistema, como também,
- (ii) as características ondulatórios do escoamento.

Apesar do modelo físico adotado ser bastante representativo das configurações encontradas nos principais Metrôs do mundo, houve a preocupação de se estruturar o programa de forma a possibilitar, sem grandes modificações no arranjo original, a simulação de outras configurações, assim como, posteriormente, utilizar dados experimentais mais refinados que incluiriam efeitos secundários não abordados neste estudo.

Para se efetuar a simulação aerodinâmica de um sistema completo há a necessidade de se desenvolverem modelos para o escoamento nas estações e nos túneis com duas linhas. As estações, devido a diversidade de arranjos construtivos e multiplicidade de componentes, apresentam sérias dificuldades na padronização do programa simulador e no cálculo das perdas de carga, requerendo, nesta tarefa, um número elevado de dados experimentais. As referências [14] e [15] apresentam uma série de informações qualitativas e quantitativas a respeito do problema, obtidas através de exaustivos estudos com modelos em escala reduzida. O escoamento nos túneis de via dupla é extremamente complexo. Envolve a composição de dois fluxos principais, opostos, através das colunas de separação das vias, não possibilitando, portanto, o enfoque unidimensional e exigindo estudos de modelagem bastante amplos para o equacionamento do fenômeno. Nesta parte do sistema há, ainda, muito a pesquisar.

A análise das formas mais eficazes de controle do meio para assegurar os critérios pré-estabelecidos de conforto e segurança em um sistema de transporte rápido, exige a utilização de um modelo de simulação térmica, que indique as distribuições de temperatura e umidade do ar, associadas a cada esquema operacional. Os

conteúdos de calor sensível e latente do ar são afetados pela adição ou remoção de calor através dos equipamentos subterrâneos, trens e usuários, assim como pela taxa de transferência de calor com as paredes do sistema e com o ar externo. O propósito do modelo é simular matematicamente todos estes fatores. Durante os cálculos, os valores instantâneos da velocidade do ar seriam obtidos da simulação aerodinâmica. As rejeições instantâneas de calor, oriundas das fontes dinâmicas do sistema (das quais o mais importante é o trem) seriam fornecidas em função de suas características de performance. As referências [10] e [11] relatam os pormenores da construção de um destes modelos.

Apesar de já haver um número razoável de trabalhos versando sobre diversos aspectos relacionados ao meio ambiente em Metrô, ainda não se conseguiu elaborar modelos que simulam com precisão o funcionamento de todo o sistema. Um dos maiores obstáculos tem sido a insuficiência de dados experimentais, cuja obtenção surge como pré-requisito para desenvolvimentos futuros nesta área.

REFERÊNCIAS

- [1] Hildebrand, F.B., Advanced Calculus for Applications - Cap. 8, Prentice-Hall, Inc.
- [2] Lister, M., "The Numerical Solution of Hyperbolic Partial Differential Equations by the Method of Characteristics" - Mathematical Methods for Digital Computers - Cap. 15, Vol. I, John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Streeter, V.L., Hydraulic Transients - Caps. 1, 2 e 3, McGraw-Hill, Inc.
- [4] Brock, E., "Development of Formulae for Calculating Ventilation for the Chicago Subways", Journal of the Western Society of Engineers - Jun. 1943.
- [5] Gouse, S.W., Jr.; Noyes, B.S., Jr.; Nwude, J.K. e Swarden, M. C., "Aerodynamic Drag on Vehicles in Tunnels", Journal of Basic Engineering - Dez. 1969.
- [6] Gouse, S.W., Jr. e Wali, E.I., "Tube Vehicle Systems: Aerodynamics Characteristics", Report PB 204 933 to Transportation Research Institute, National Technical Information Service - Out. 1971.
- [7] Brown, W.G., "Basic Theory of Rapid - Transit Tunnel Ventilation", Journal of Engineering for Industry - Fev. 1966.
- [8] Dayman, B. e Kurtz, D.W., "Experimental Studies Relating to the Aerodynamics of Trains Travelling in Tunnels at Low Speeds" International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels - Abr. 1973. Published by BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England.
- [9] Kaiser Engineers (Consulting Engineers), "Single-Track Subway System Components, Subway Environmental Research Project", Technical Report No. UMTA-DC-MTD-7-71-3 to Institute for Rapid Transit (Washington, D.C.) - U.S. Department of Transportation (Jan. 1971).

- [10] Parsons, Brinckerhoff, Quade & Douglas, Inc. (Consulting Engineers), "Development of Basic Mathematical Models for Subway Environmental Simulation", Technical Report No. UMTA-DC-MTD-7-71-5 to Institute for Rapid Transit (Washington, D.C.) - U.S. Department of Transportation (Mar. 1971).
- [11] Parsons, Brinckerhoff, Quade & Douglas, Inc. (Consulting Engineers), "Single-Track Subway Environmental Simulation Model" Technical Report No. UMTA-DC-MTD-7-71-22 to Institute for Rapid Transit (Washington, D.C.) - U.S. Department of Transportation (Aug. 1971).
- [12] Kaiser Engineers (Consulting Engineers), "Research Bibliography Ventilation and Environmental Control in Subway Rapid Transit Systems", Technical Report No. UMTA-DC-MTD-7-71-27 to Institute for Rapid Transit (Washington, D.C.) - U.S. Department of Transportation (Aug. 1971).
- [13] Parsons, Brinckerhoff, Quade & Douglas, Inc. (Consulting Engineers), "Single-Track System Concept Study", Technical Report No. UMTA-DC-06-0010-72-19 to Institute for Rapid Transit (Washington, D.C.) - U.S. Department of Transportation (Dec. 1972)
- [14] Aerospace Technology, Division of Developmental Sciences, Inc. "Vent and Station Test Facility Design", Technical Report No. UMTA-DC-MTD-7-71-11 to Institute for Rapid Transit (Washington D.C.) - U.S. Department of Transportation (Jan. 1971).
- [15] Aerospace Technology, Division of Developmental Sciences, Inc., "Vent and Station Test Facility Single and Double Track Station Testing", Technical Report No. UMTA-DC-06-0010-72-18 to Institute for Rapid Transit (Washington, D.C.) - U.S. Department of Transportation (Sep. 1972).
- [16] California Institute of Technology, Graduate Aeronautical Laboratories, "Preliminary Wave Analysis of Unsteady Subway Vehicle Aerodynamics", Technical Report No. UMTA-DC-MTD-7-71-33 to Institute for Rapid Transit (Washington, D.C.) - U.S. Department of Transportation (Oct. 1971)
- [17] Strom, C.R., "Aerodynamic Analysis of Vehicles in Tunnels", International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels - Apr. 1973. Published by BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England.

- [18] Hammitt, A.G., "The Aerodynamics of Vehicles Passing Through Tunnels", International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels - Abr. 1973. Published by BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England.
- [19] Foa, J.V., "Re-examination of the Aerodynamics of Vehicles in Enclosed Guideways", International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels - Abr. 1973. Published by BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England.
- [20] Fox, J.A. e Vardy A.E., "The Generation and Alleviation of Air Pressure Transients caused by the High Speed Passage of Vehicles Through Tunnels" International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels - Abr. 1973. Published by BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England.
- [21] Gaillard, M.A., "Aerodynamic of Trains in Tunnels", International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels - Abr. 1973. Published by BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England.
- [22] Danziger, N.H., "Research and Analysis of Subway Rapid Transit System Aerodynamics and Thermodynamics", International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels - Abr. 1973. Published by BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England.
- [23] Hark, W.B., "Environmental Control in Rail Tunnels", International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels - Abr. 1973. Published by BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England.
- [24] Capella, A., Sanchez, J.L. e Tinoco, J., "Algunos Problemas Relacionados con la Ventilacion de las Lineas del Metro de la Ciudad de México". Facultad de Ingenieria, UNAM.
- [25] Bendelius, A.G. e Metsch, W.W., "Environmental Control for the Caracas Metro", ASHRAE Journal - Set. 1973.
- [26] Burton, D.R. "Thermal Comfort Studies: A Theoretical Assessment", ASHRAE Journal - Ago. 1972.
- [27] Kaiser Engineers (Consulting Engineers), "Subway Environment Design Criteria", Technical Report No. UMTA-DC-MTD-7-71-26 to Institute for Rapid Transit (Washington, D.C.) - U.S. Depart-

ment of Transportation (Set. 1971).

- [28] Companhia do Metropolitano de São Paulo, Sistemas de Ventilação: Linha Norte-Sul (Especificações Técnicas e Desenhos).
- [29] Companhia do Metropolitano de São Paulo, Manual de Projeto de Ventilação (Circulação interna) - Fev. 1976.

Fig.3- Posições relativas entre as curvas características e as curvas distância-tempo da frente e traseira do veículo.

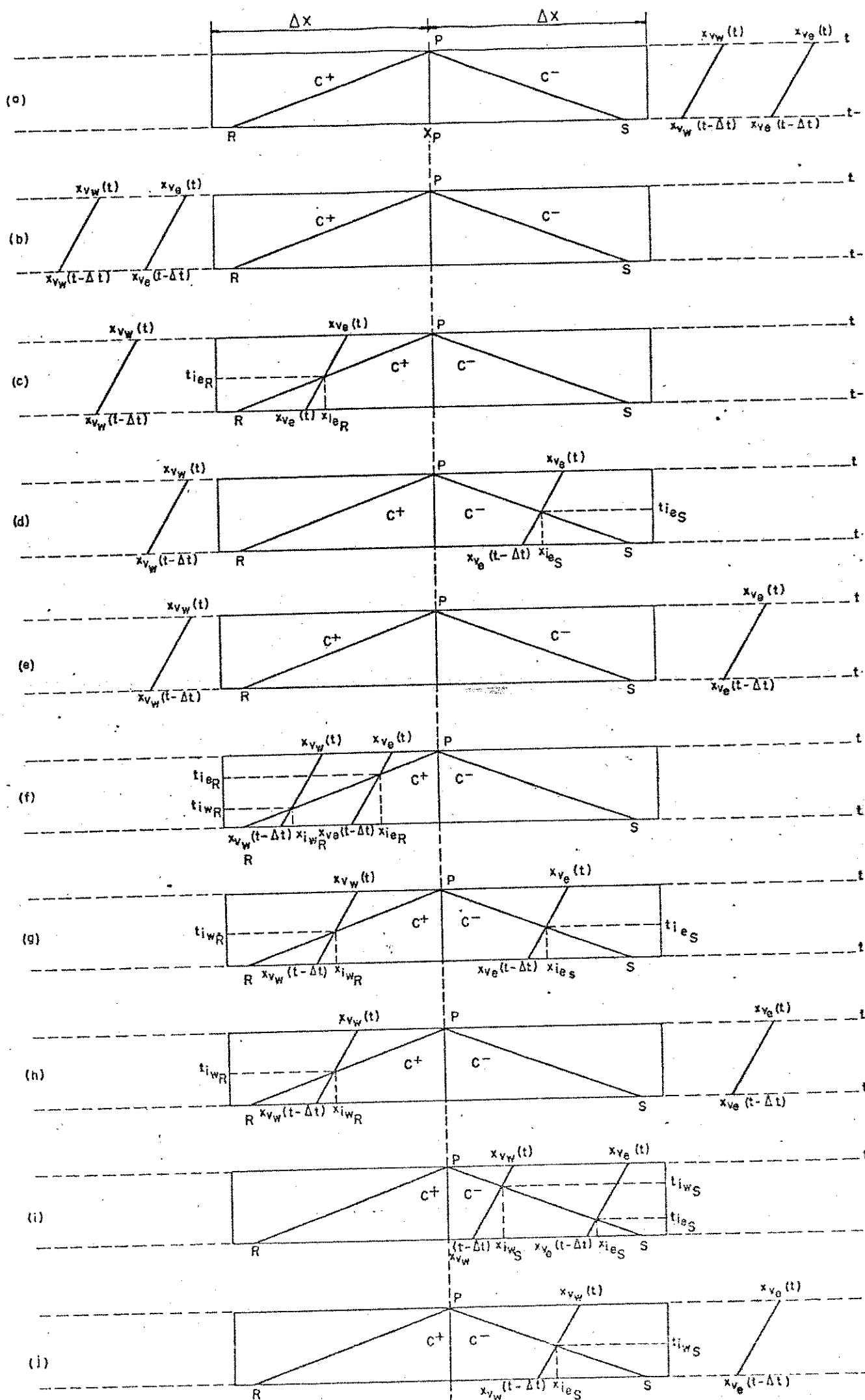
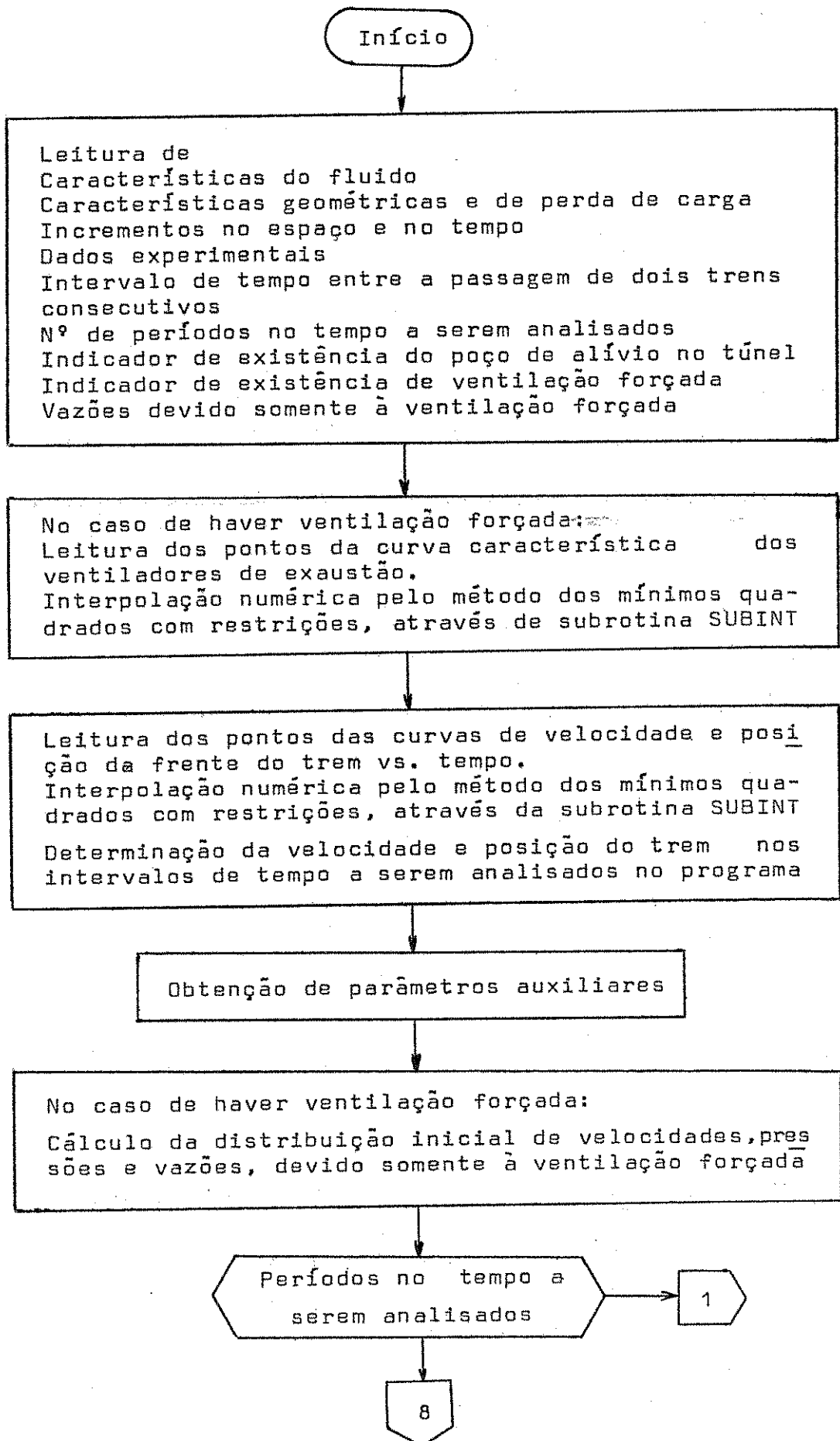
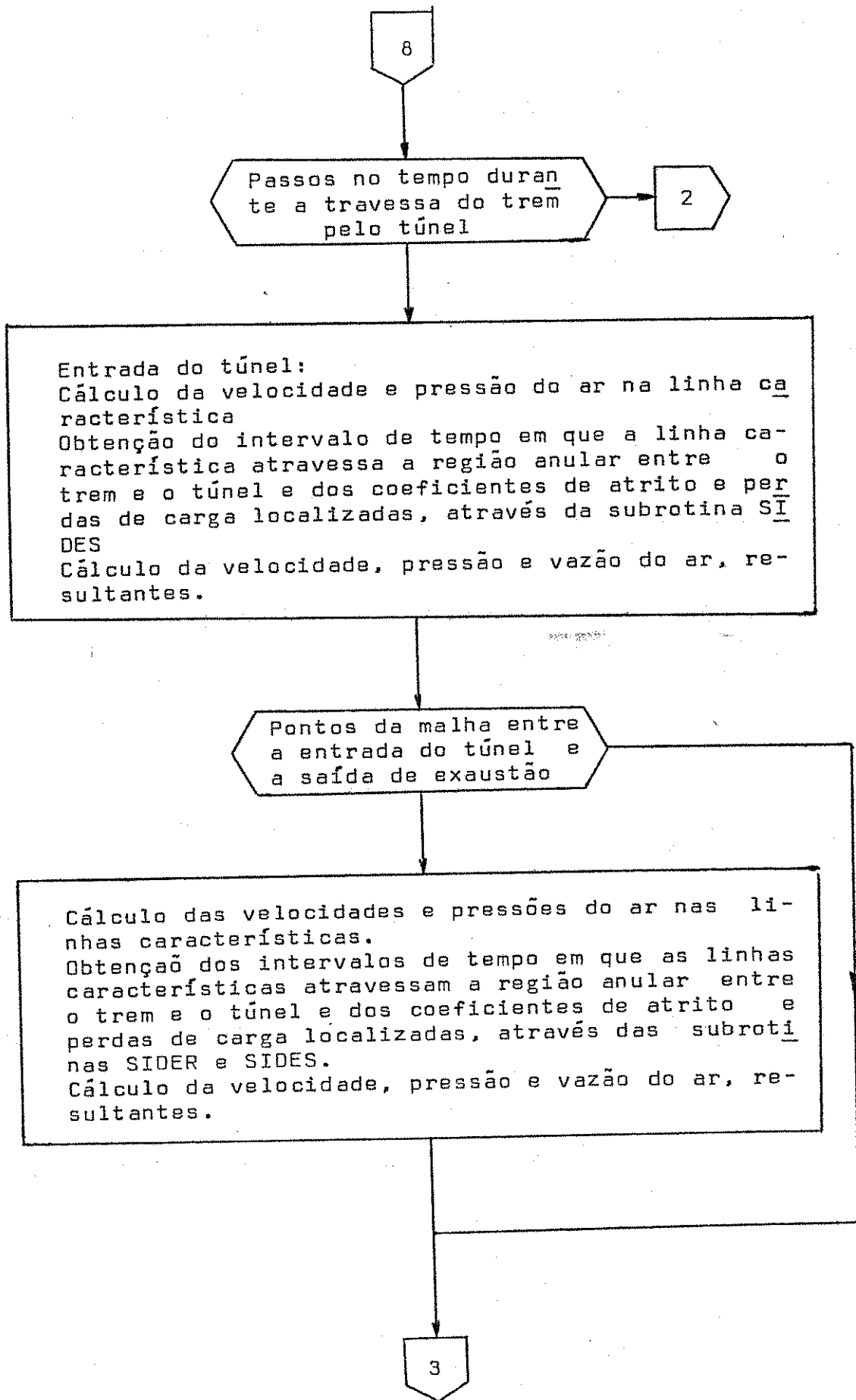


Fig. 4 FLUXOGRAMA BÁSICO





3

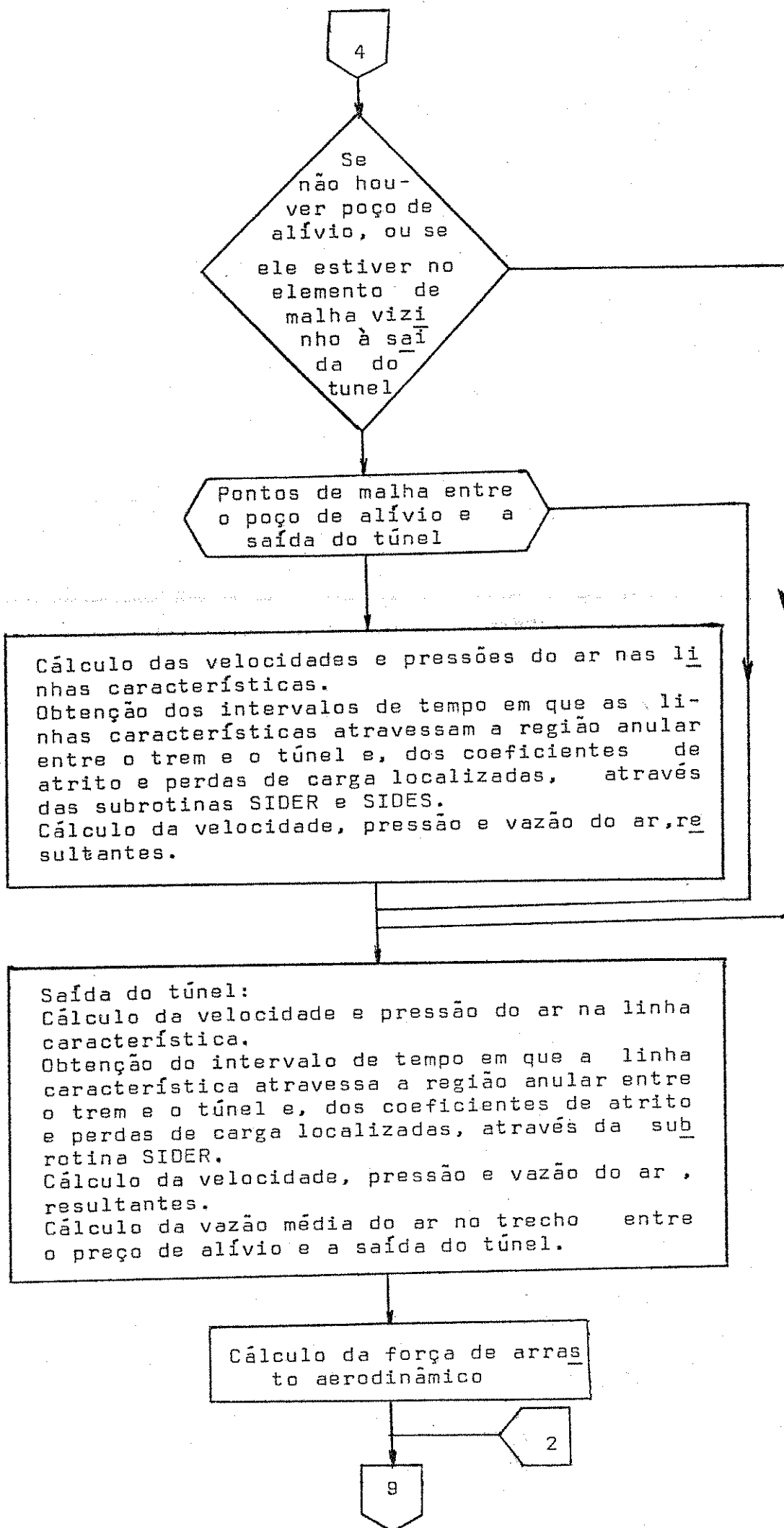
Saída de Exaustão:
Cálculo das velocidades e pressões do ar nas linhas características.
Obtenção dos intervalos de tempo em que as linhas características atravessam a região anular entre o trem e o túnel e, dos coeficientes de atrito e perda de carga localizadas, através das subrotinas SIDER e SIDES.
Cálculo da velocidade, pressão e vazão do ar, resultantes. No caso de haver ventilação força da leva-se em conta a curva característica dos ventiladores assim como as características de perda de carga dos dutos de exaustão. Caso contrário, somente o último efeito é considerado.
Cálculo da vazão média do ar no trecho entre a entrada do túnel e a saída de exaustão.

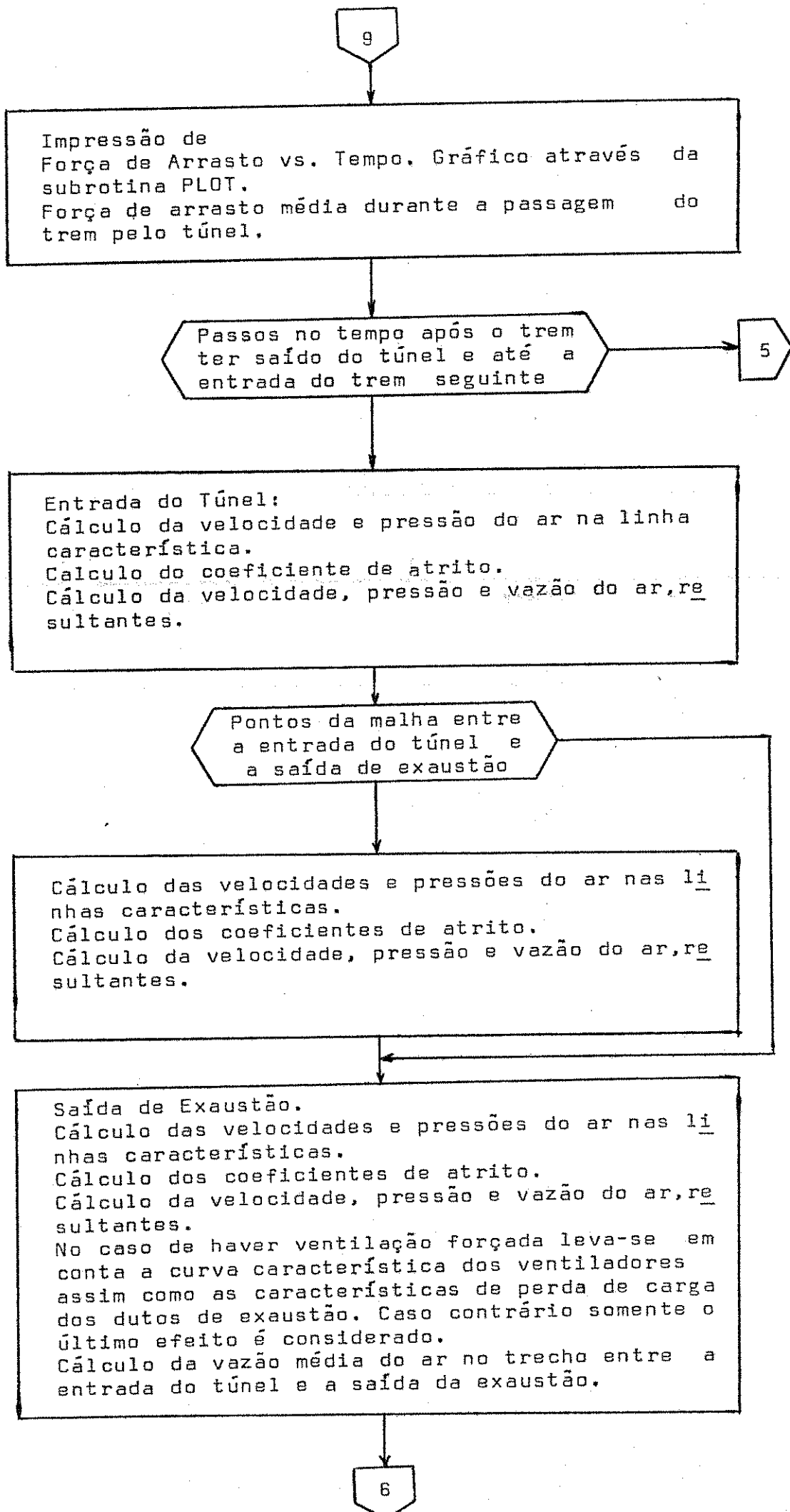
Pontos da malha entre a saída de exaustão e o poço de alívio

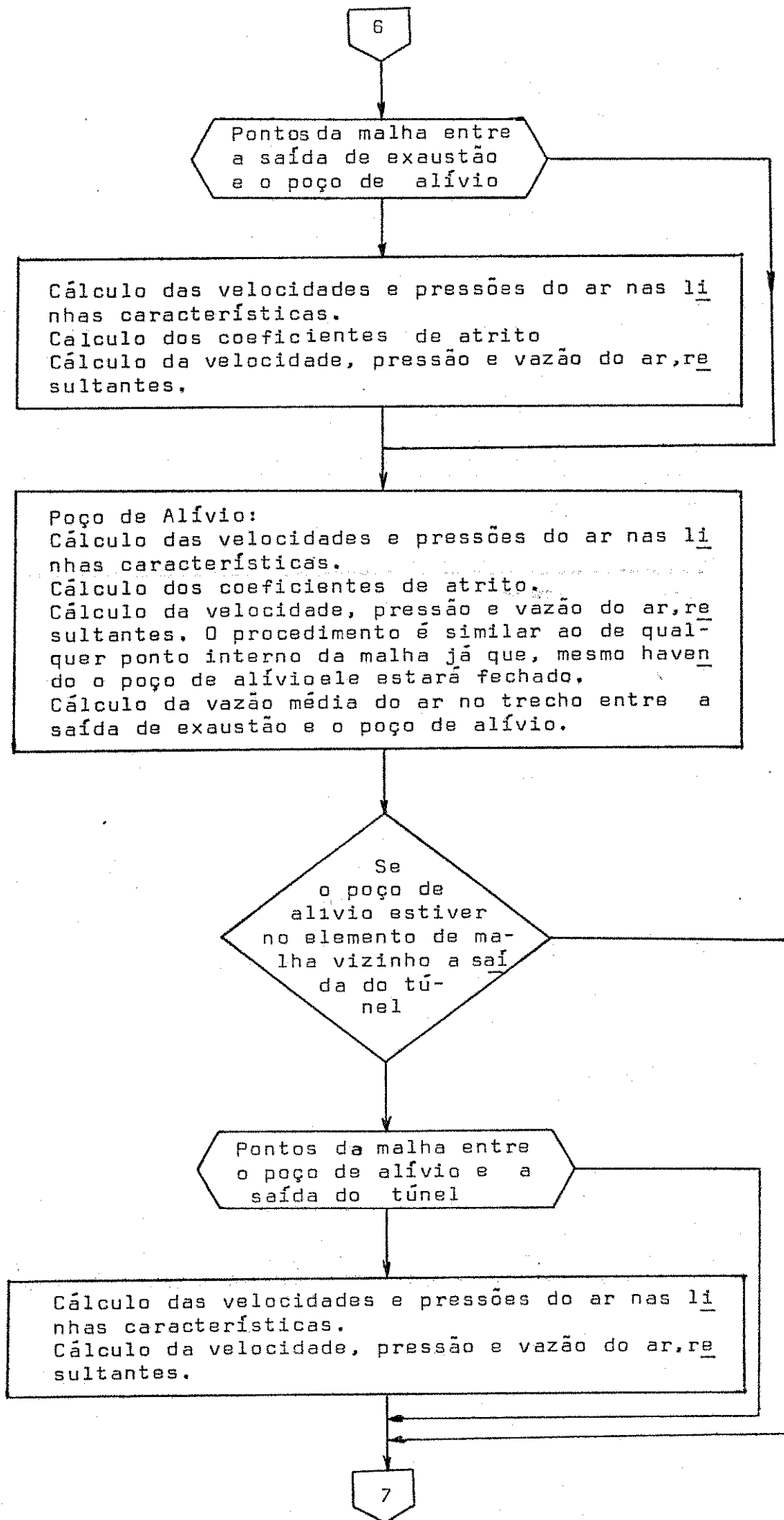
Cálculo das velocidades e pressões do ar nas linhas características.
Obtenção dos intervalos de tempo em que as linhas características atravessam a região anular entre o trem e o túnel e, dos coeficientes de atrito e perdas de carga localizadas, através das subrotinas SIDER e SIDES.
Cálculo da velocidade, pressão e vazão do ar, resultantes.

Poço de alívio:
Cálculo das velocidades e pressões do ar nas linhas características.
Obtenção dos intervalos de tempo em que as linhas características atravessam a região anular entre o trem e o túnel e, dos coeficientes de atrito e perdas de carga localizadas, através das subrotinas SIDER e SIDES.
Cálculo da velocidade, pressão e vazão do ar, resultantes. Quando a válvula do poço estiver aberta, considerar-se-ão as características de perdas de carga dos dutos. Quando ela estiver fechada ou simplesmente o poço não existir, o cálculo é similar ao de qualquer ponto interno da malha.
Cálculo da vazão média do ar no trecho entre a saída de exaustão e o poço de alívio.

4







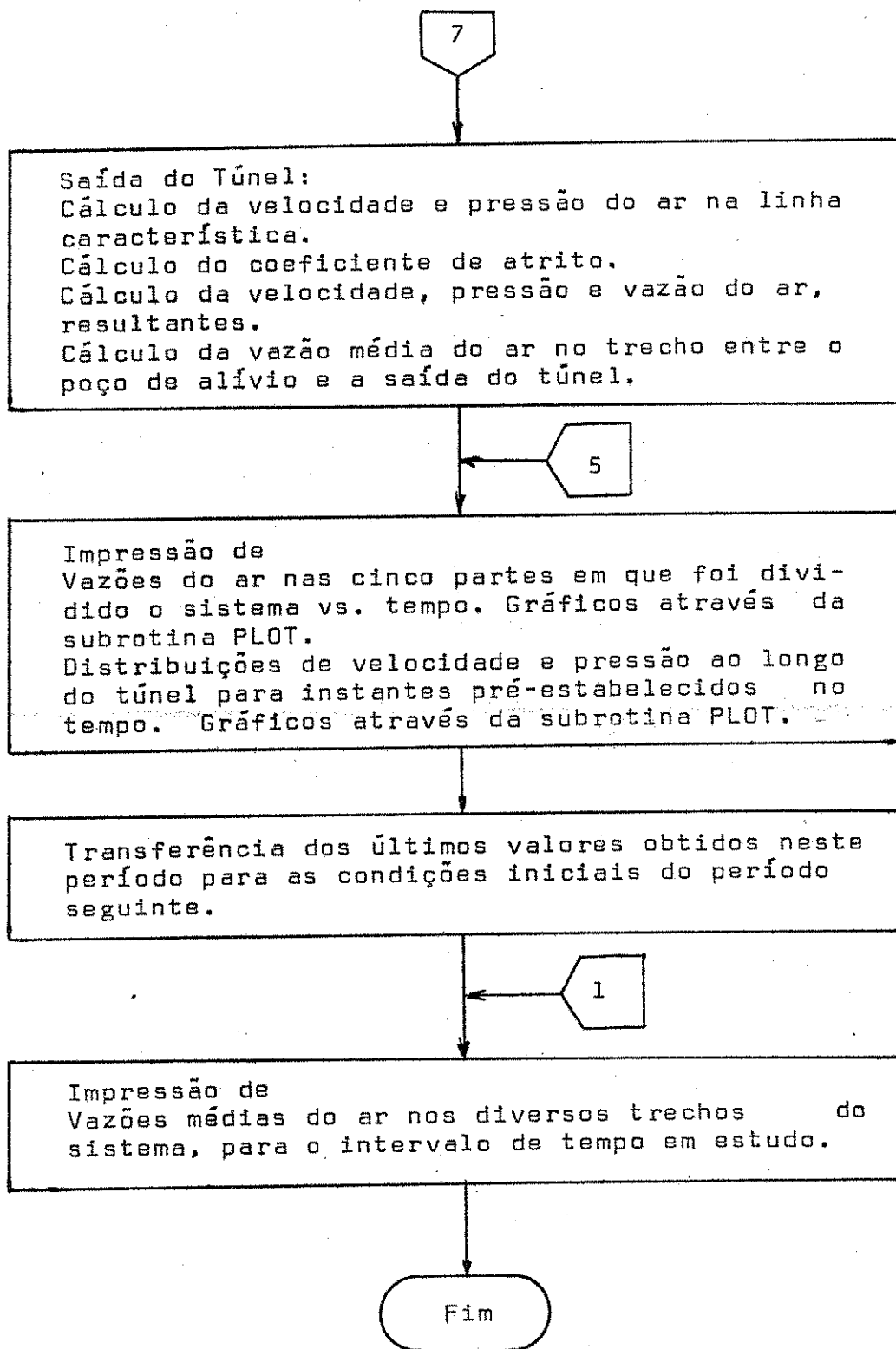
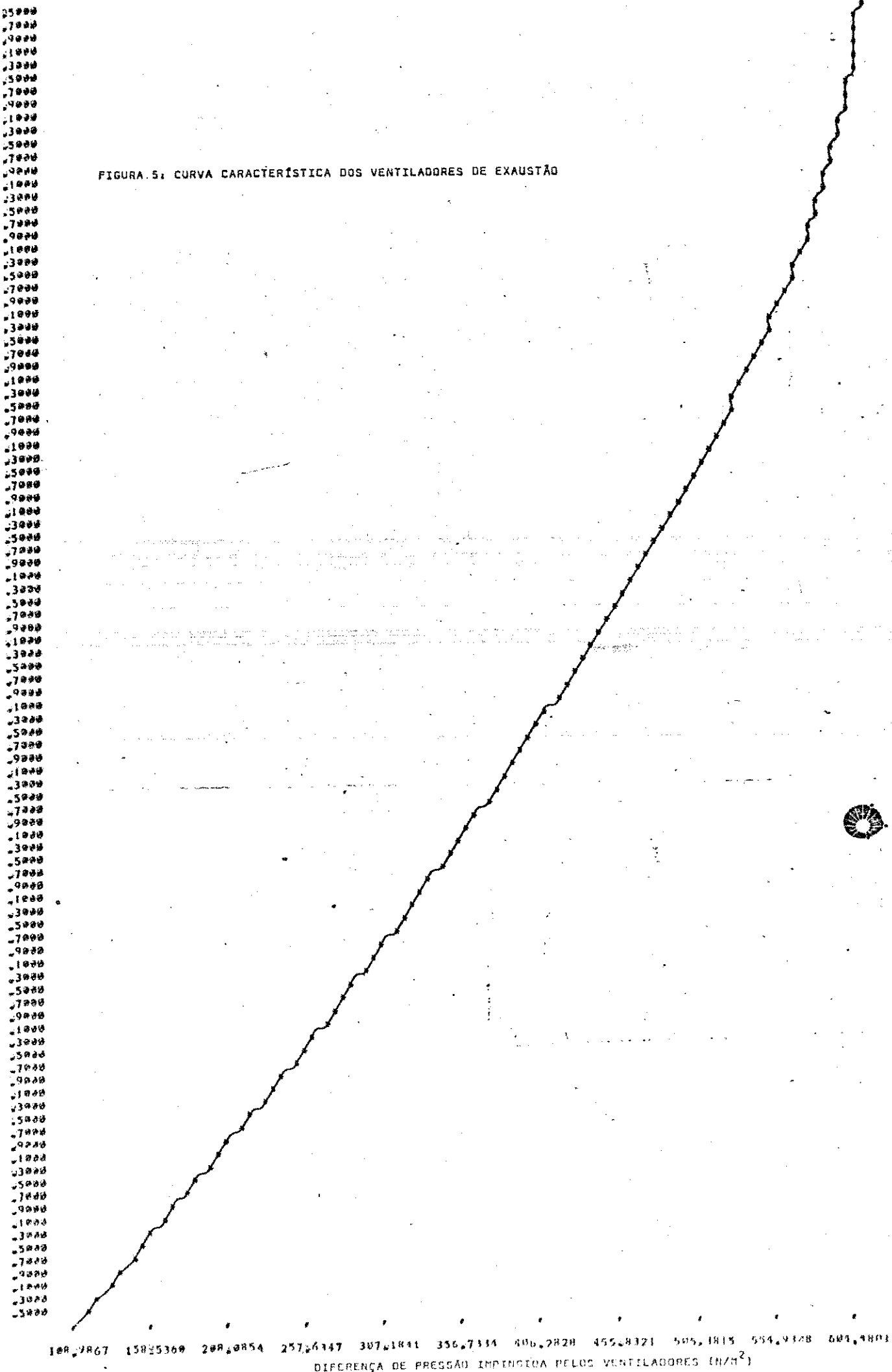
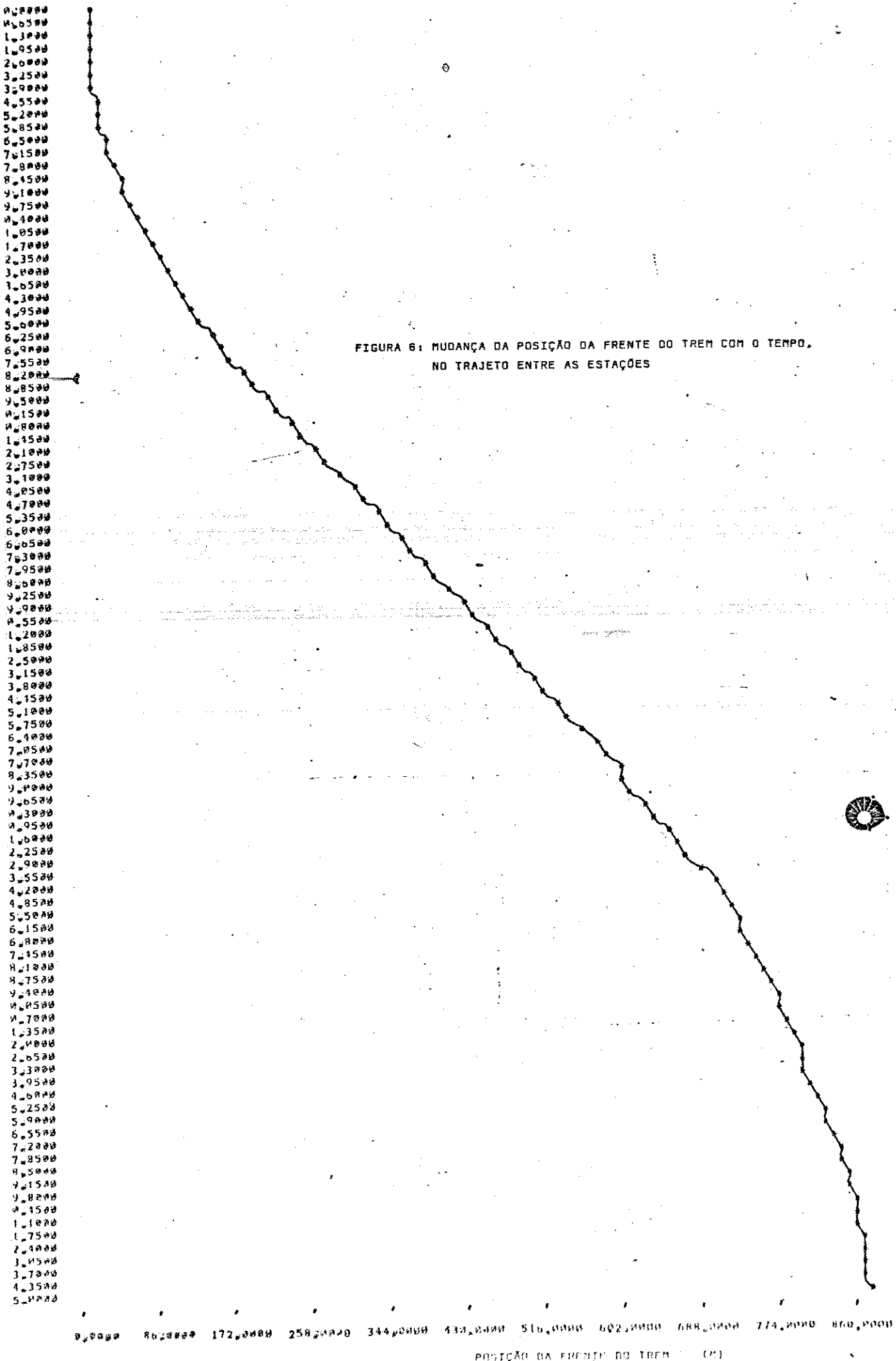
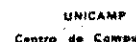




FIGURA.5: CURVA CARACTERÍSTICA DOS VENTILADORES DE EXAUSTÃO







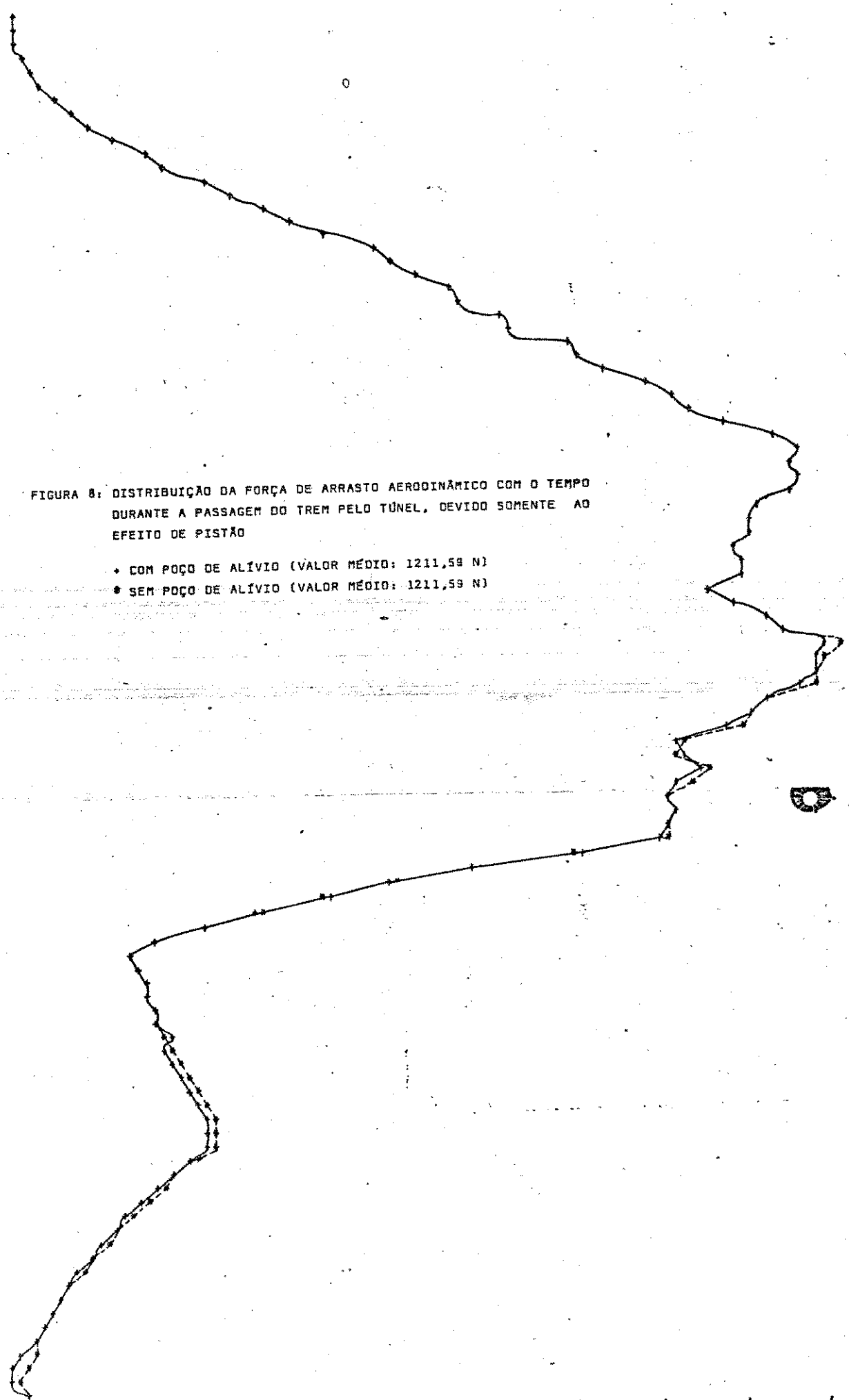
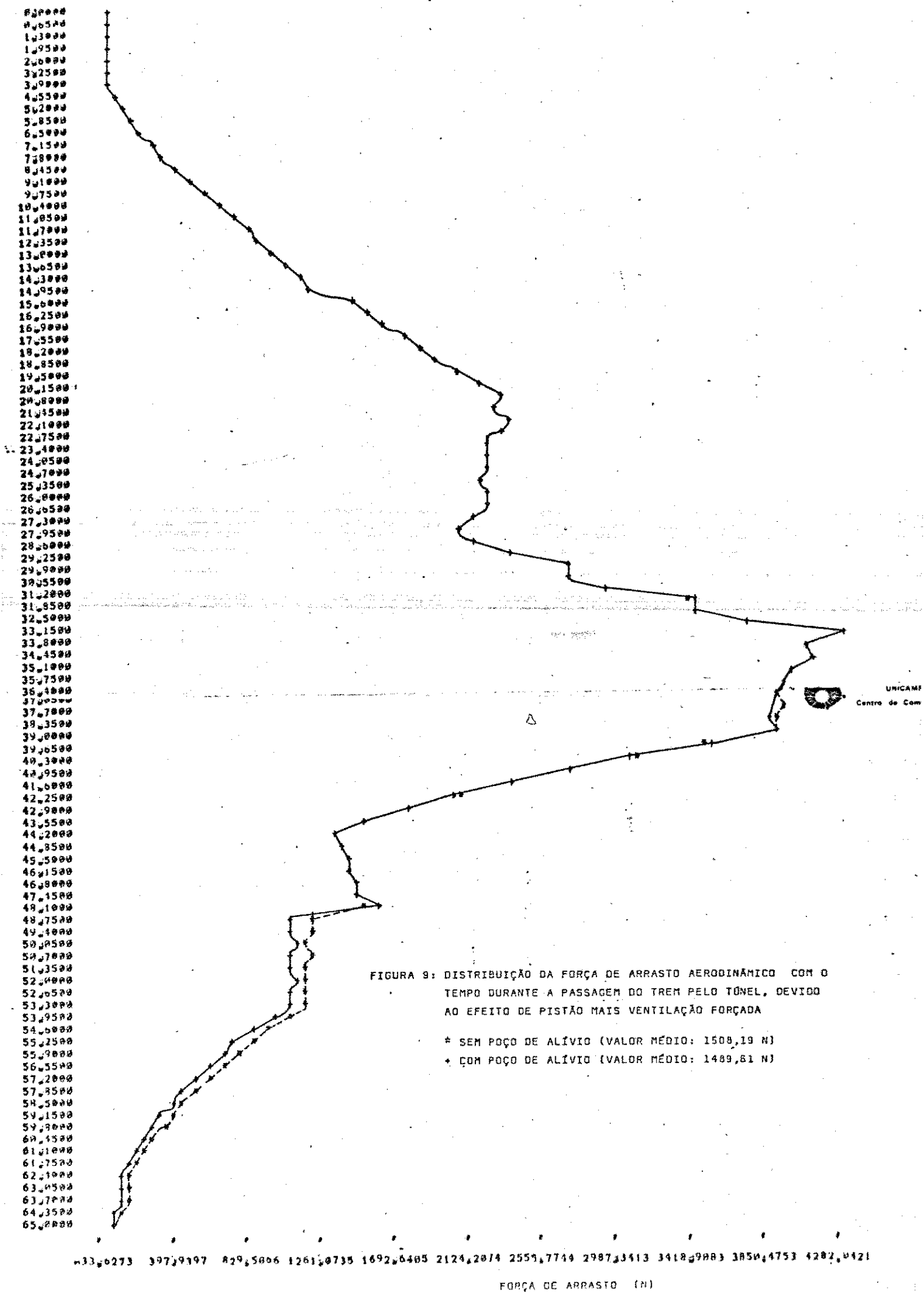


FIGURA 8: DISTRIBUIÇÃO DA FORÇA DE ARRASTO AERODINÂMICO COM O TEMPO DURANTE A PASSAGEM DO TREM PELO TÚNEL, DEVIDO SOMENTE AO EFEITO DE PISTÃO

+ COM POÇO DE ALÍVIO (VALOR MÉDIO: 1211,59 N)
* SEM POÇO DE ALÍVIO (VALOR MÉDIO: 1211,59 N)



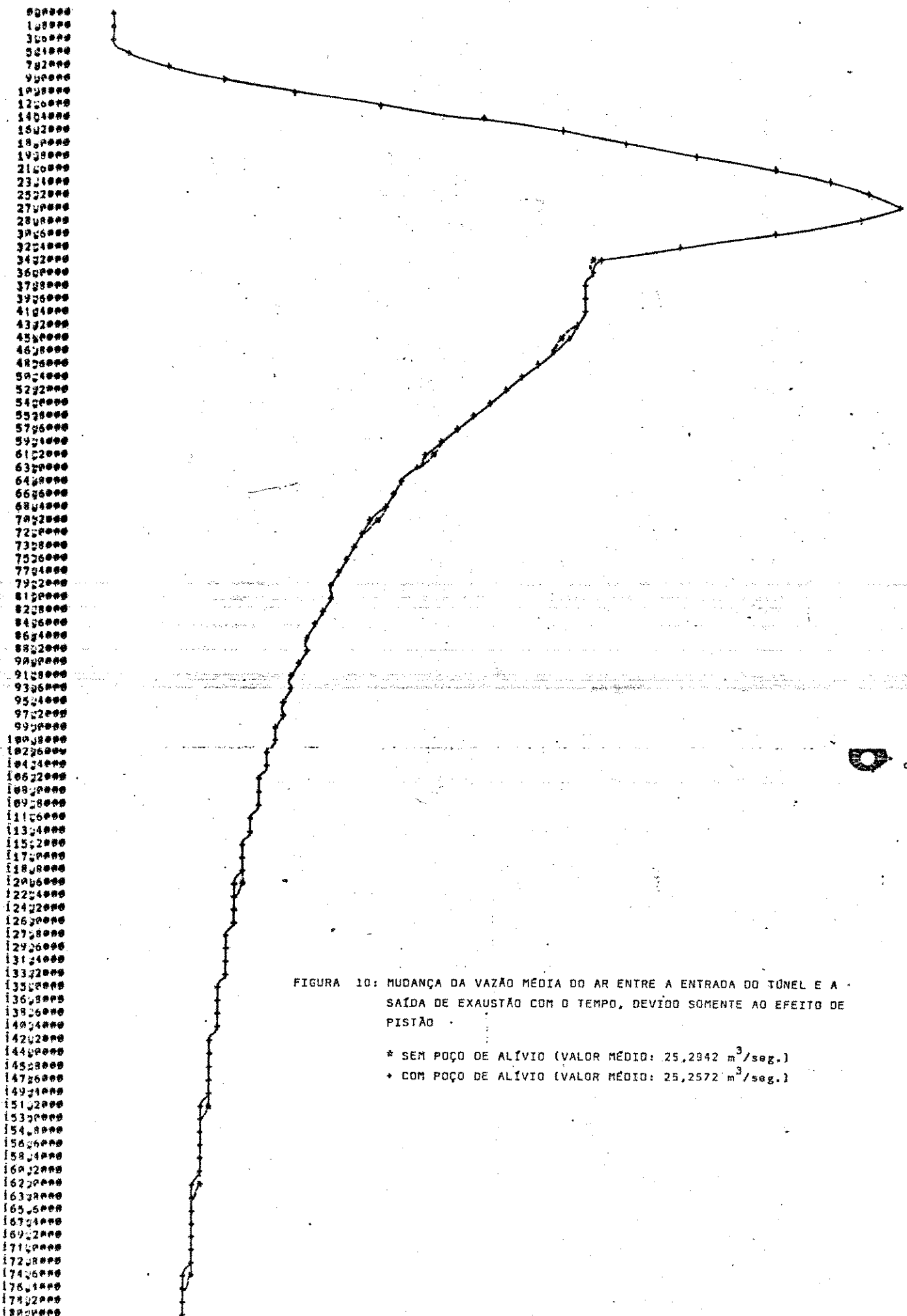
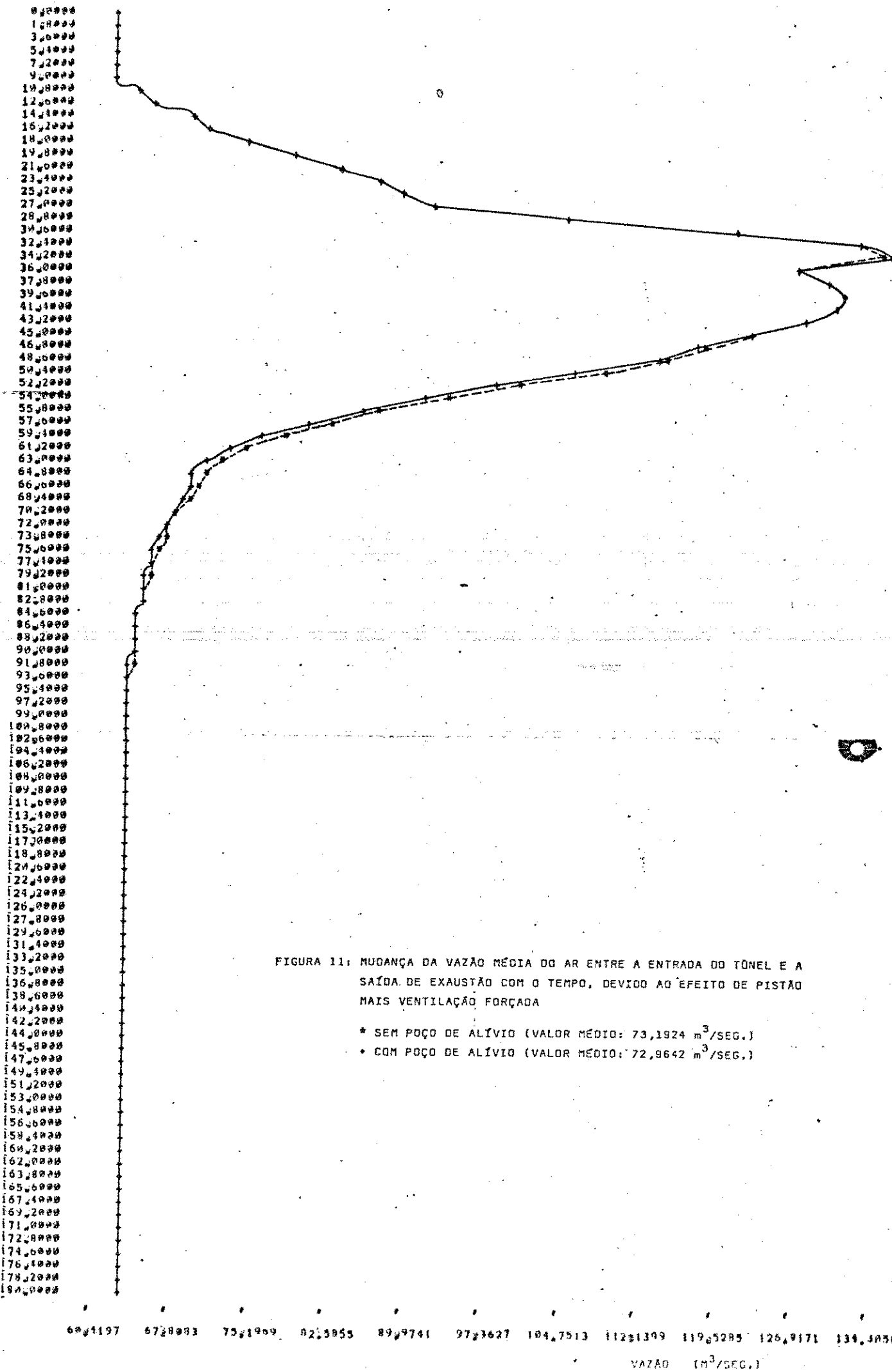


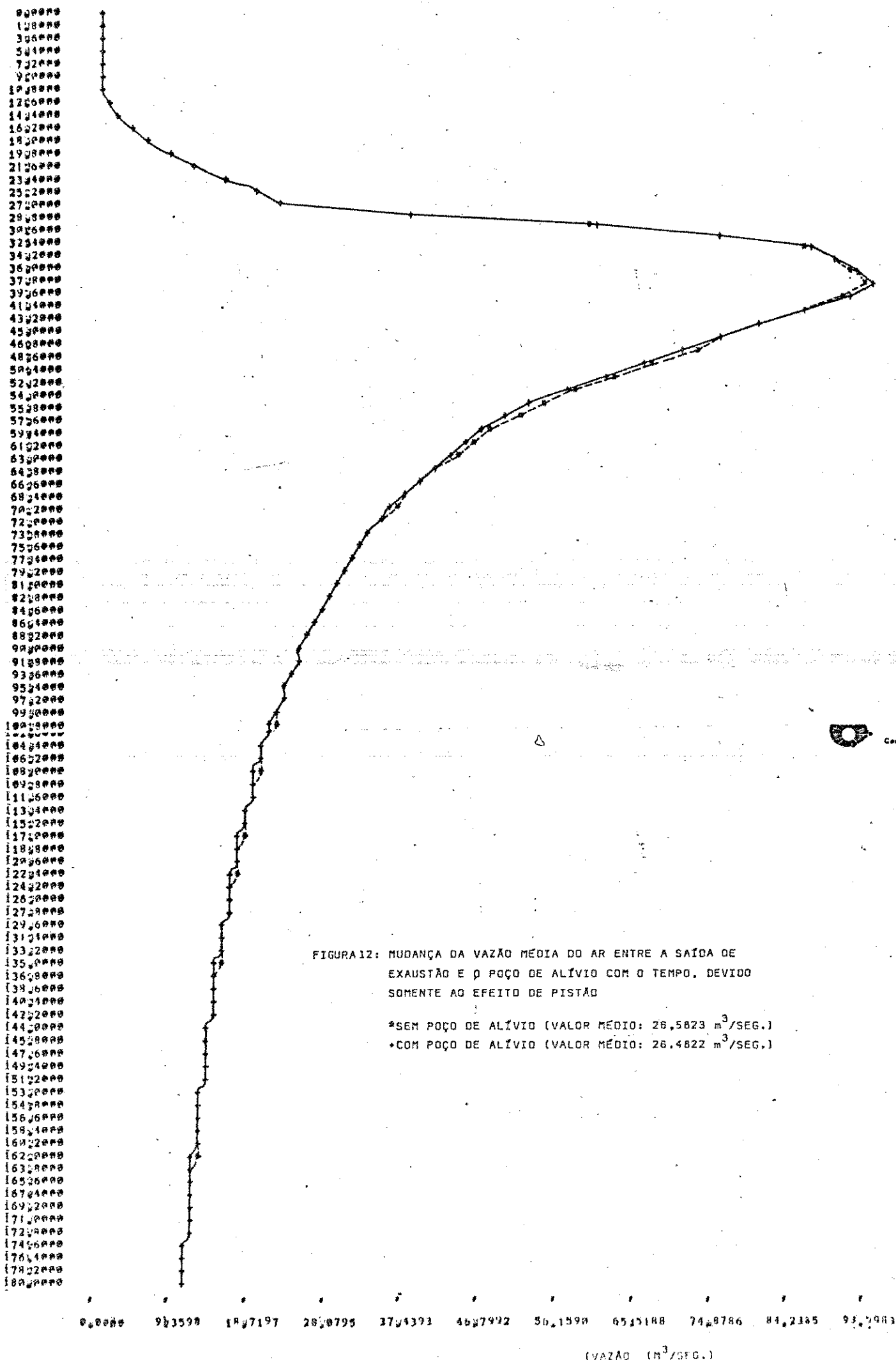
FIGURA 10: MUDANÇA DA VAZÃO MÉDIA DO AR ENTRE A ENTRADA DO TÚNEL E A SAÍDA DE EXAUSTÃO COM O TEMPO, DEVIDO SOMENTE AO EFEITO DE PISTÃO

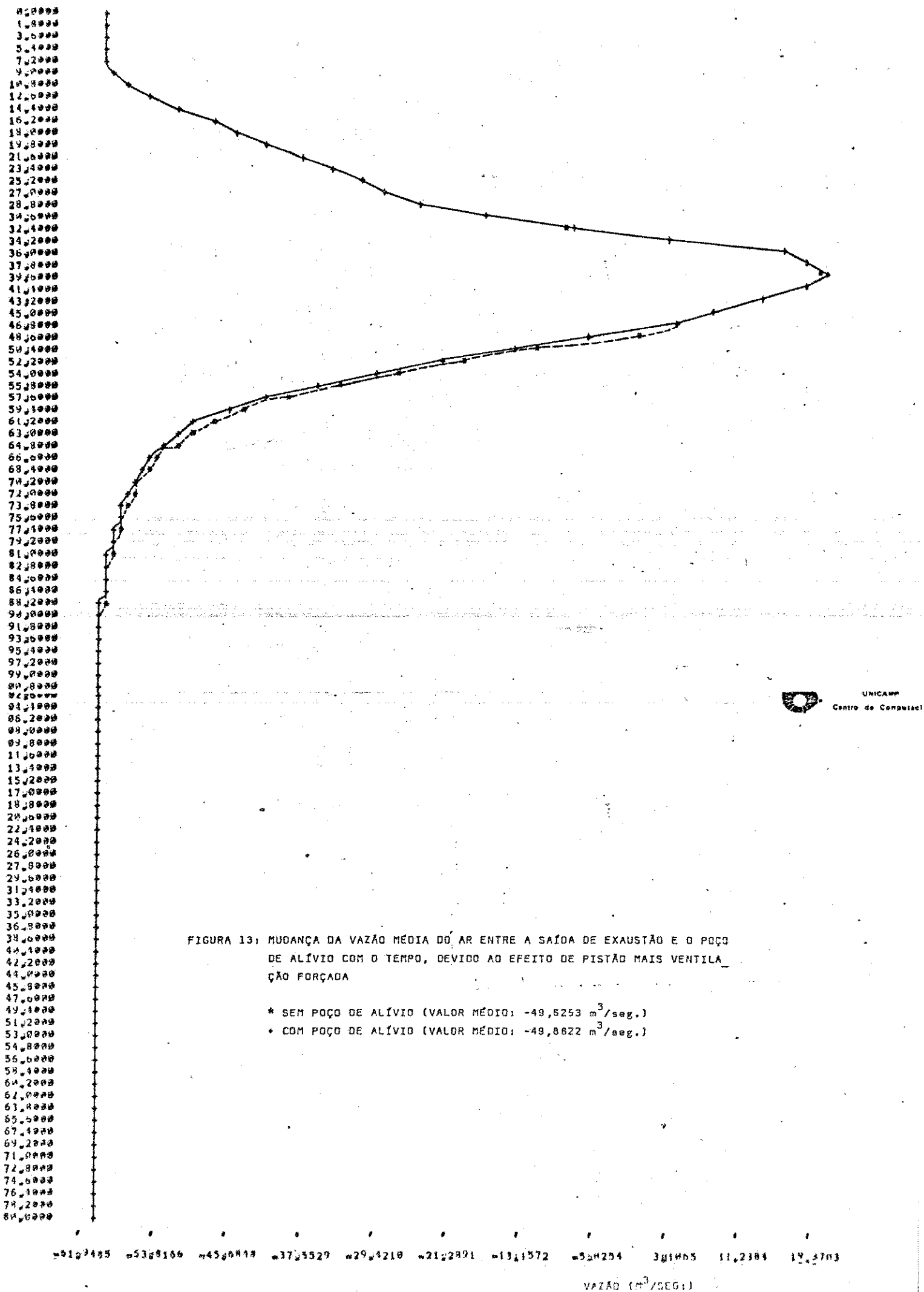
* SEM POÇO DE ALÍVIO (VALOR MÉDIO: 25,2942 m³/seg.)
+ COM POÇO DE ALÍVIO (VALOR MÉDIO: 25,2572 m³/seg.)

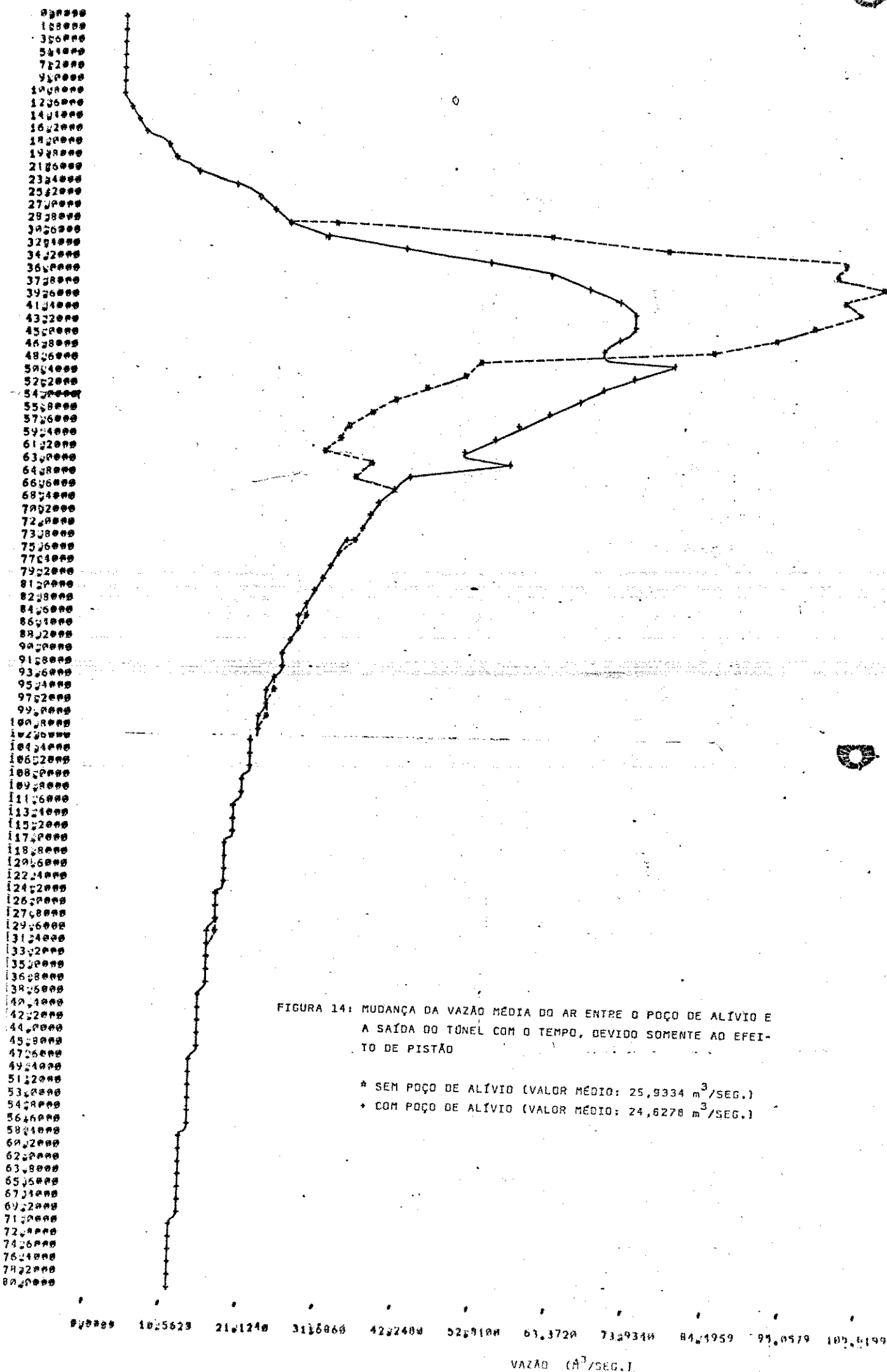
0.0000 8.2038 16.4068 24.6091 32.8121 41.0151 49.2181 57.4211 65.6242 73.8272 82.0302

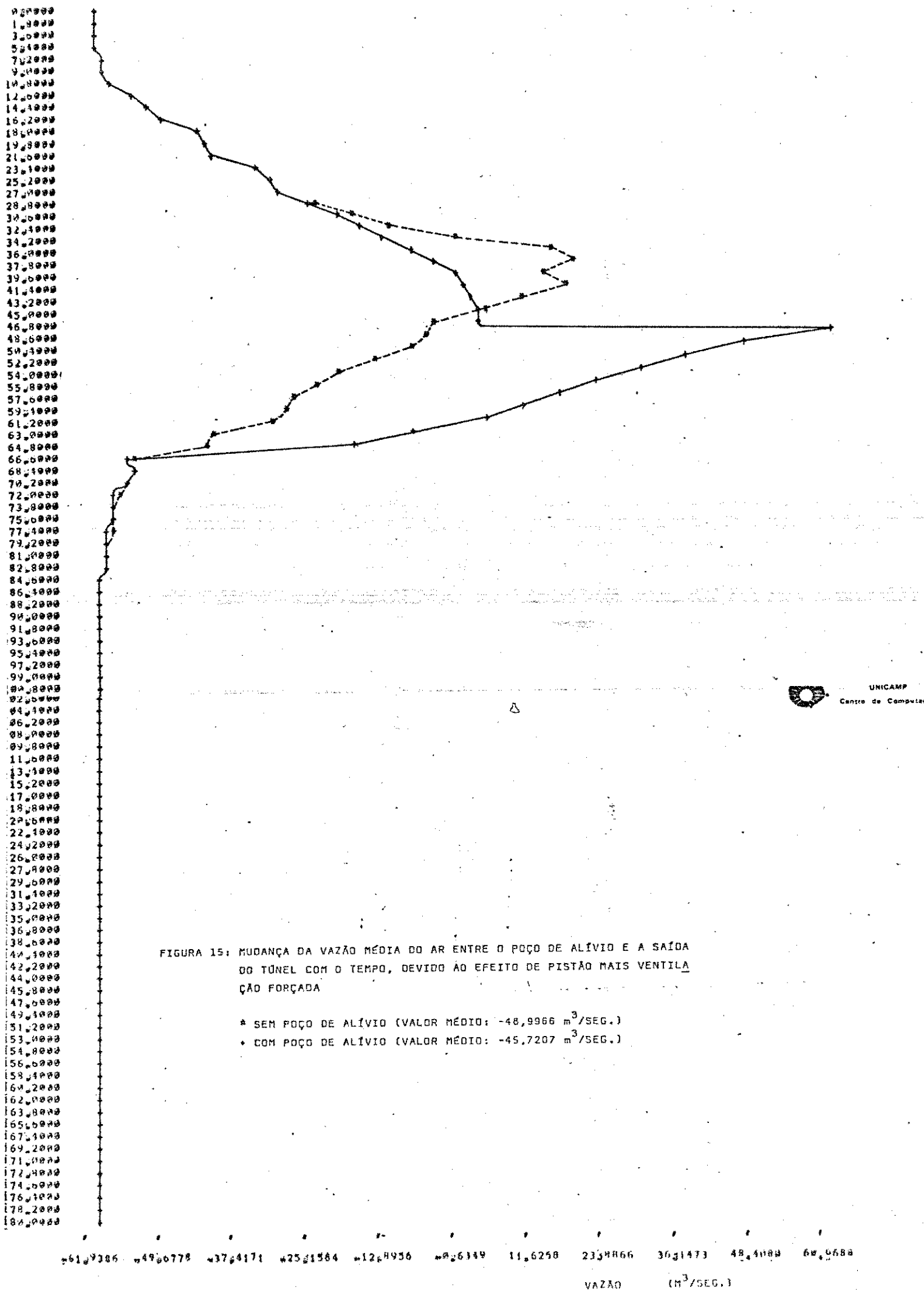
VAZÃO (M³/SEG.)













020000
120000
300000
500000
700000
900000
1100000
1300000
1500000
1700000
1900000
2100000
2300000
2500000
2700000
2900000
3100000
3300000
3500000
3700000
3900000
4100000
4300000
4500000
4700000
4900000
5100000
5300000
5500000
5700000
5900000
6100000
6300000
6500000
6700000
6900000
7100000
7300000
7500000
7700000
7900000
8100000
8300000
8500000
8700000
8900000
9100000
9300000
9500000
9700000
9900000
10100000
10300000
10500000
10700000
10900000
11100000
11300000
11500000
11700000
11900000
12100000
12300000
12500000
12700000
12900000
13100000
13300000
13500000
13700000
13900000
14100000
14300000
14500000
14700000
14900000
15100000
15300000
15500000
15700000
15900000
16100000
16300000
16500000
16700000
16900000
17100000
17300000
17500000
17700000
17900000
18100000

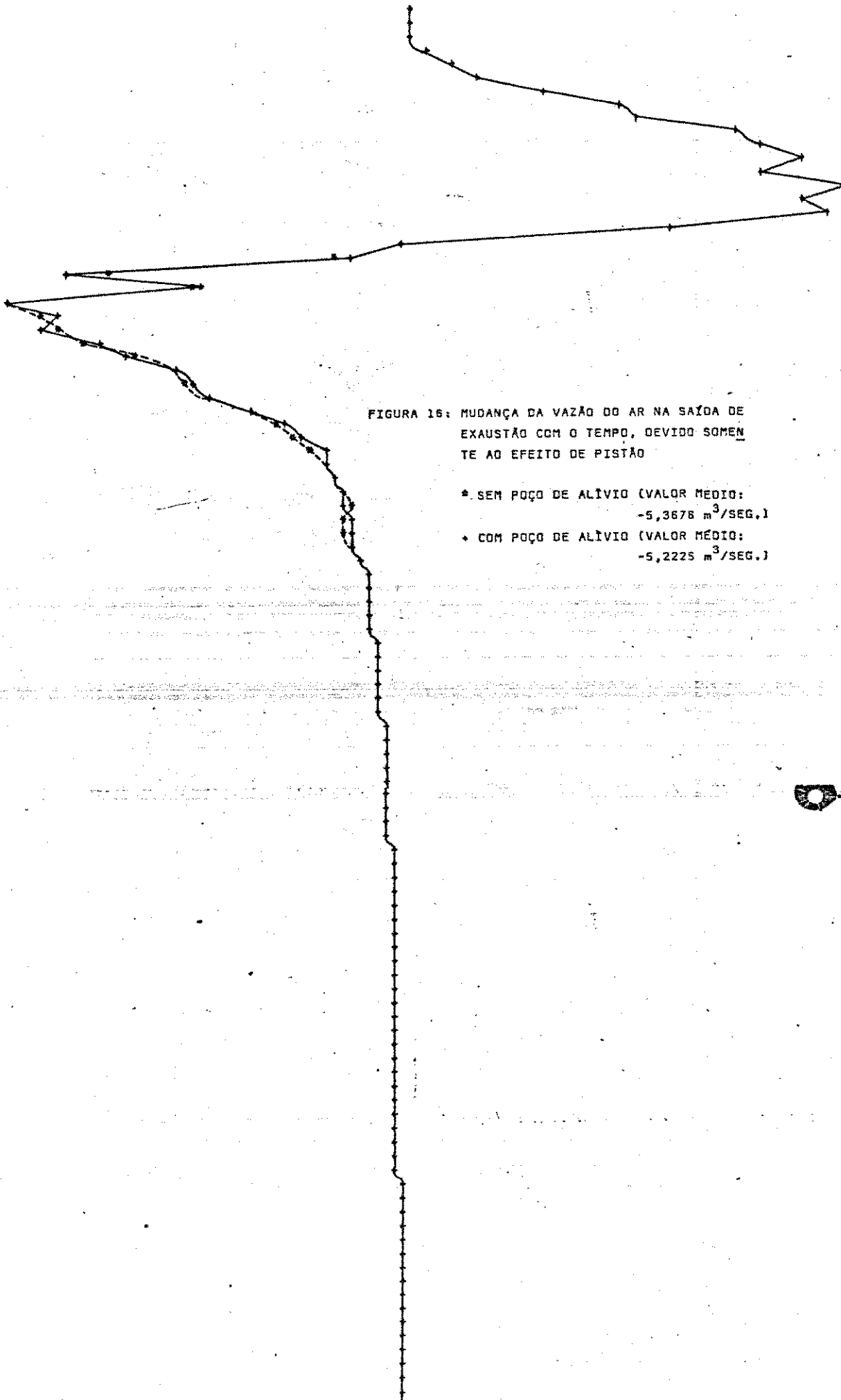


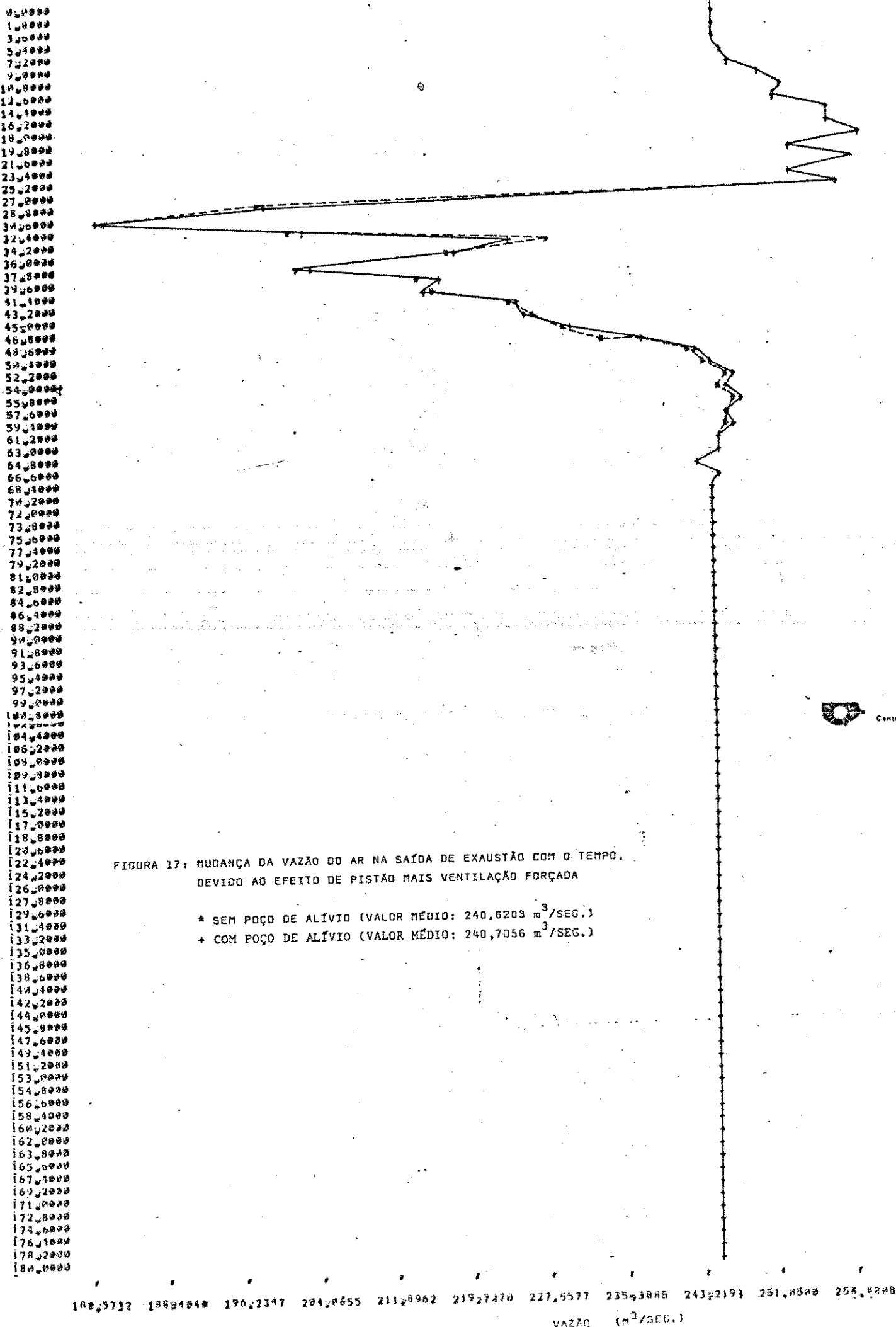
FIGURA 16: MUDANÇA DA VAZÃO DO AR NA SAÍDA DE EXAUSTÃO COM O TEMPO, DEVIDO SOMENTE AO EFEITO DE PISTÃO

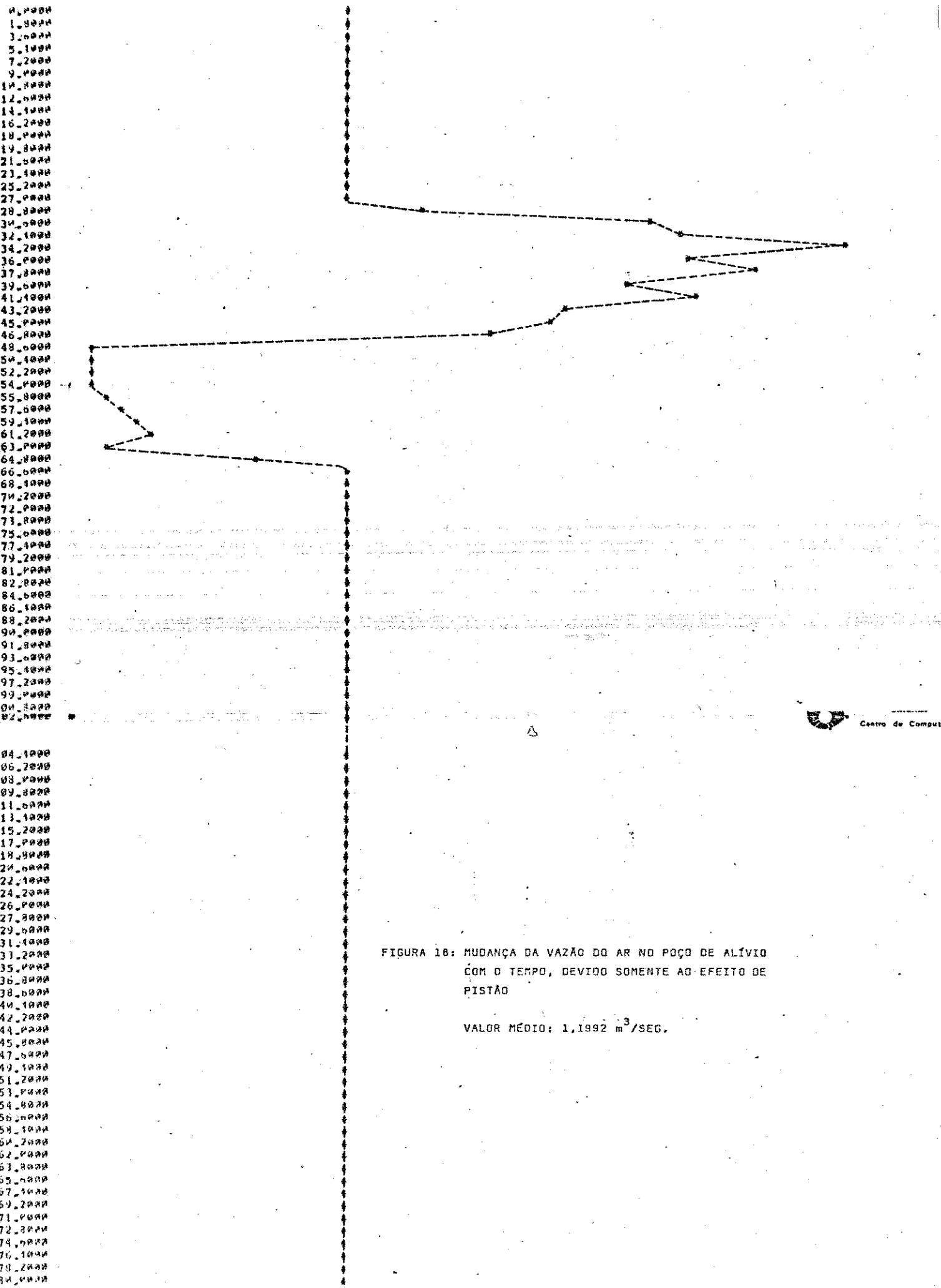
- * SEM POÇO DE ALÍVIO (VALOR MÉDIO: -5,3678 m³/SEG.)
- * COM POÇO DE ALÍVIO (VALOR MÉDIO: -5,2225 m³/SEG.)



4126,5995 4180,4222 4742,2458 488,0677 421,0984 4,2869 30,4641 56,0414 82,8187 108,9968 137,1732

VAZÃO (m³/SEG.)





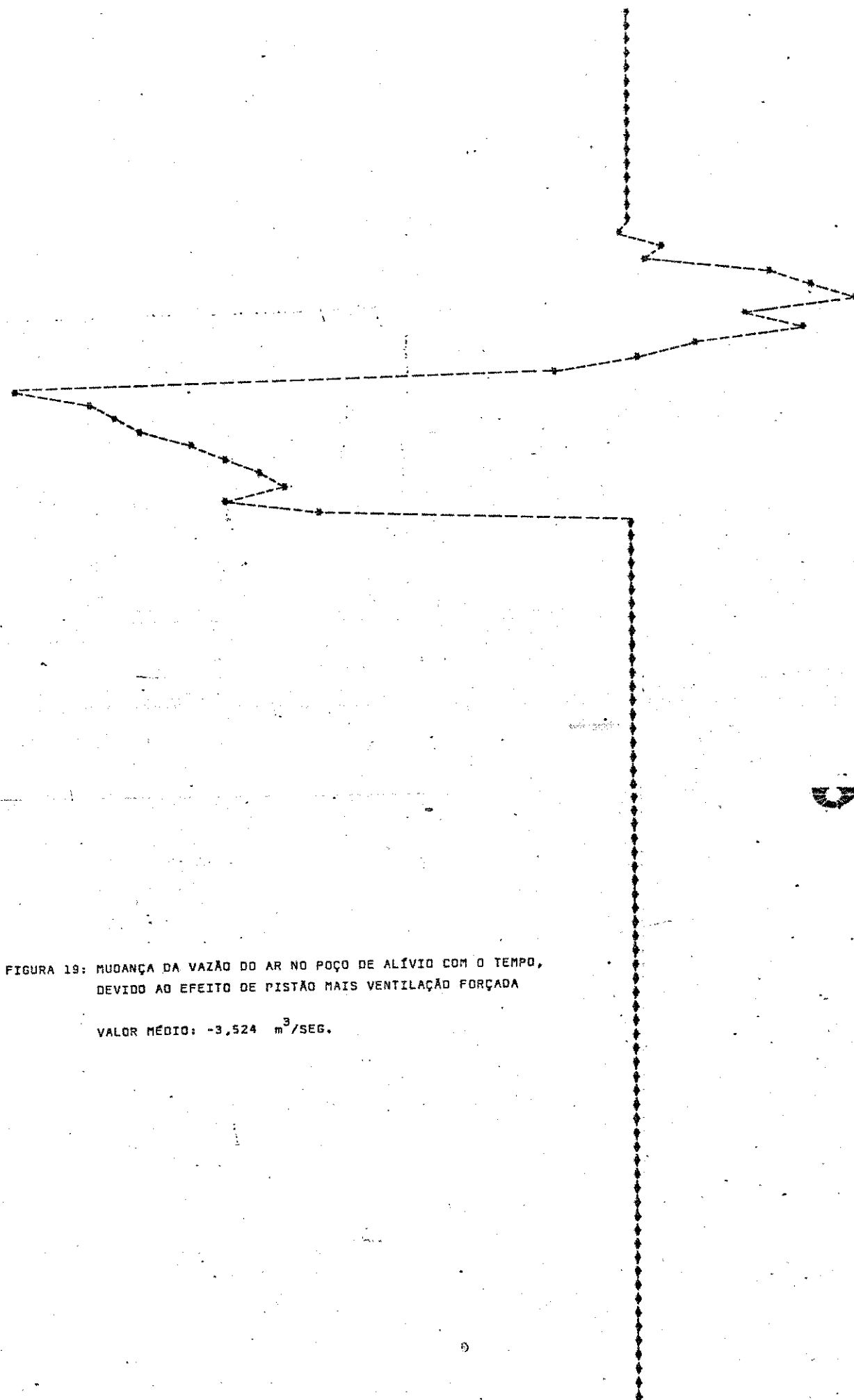
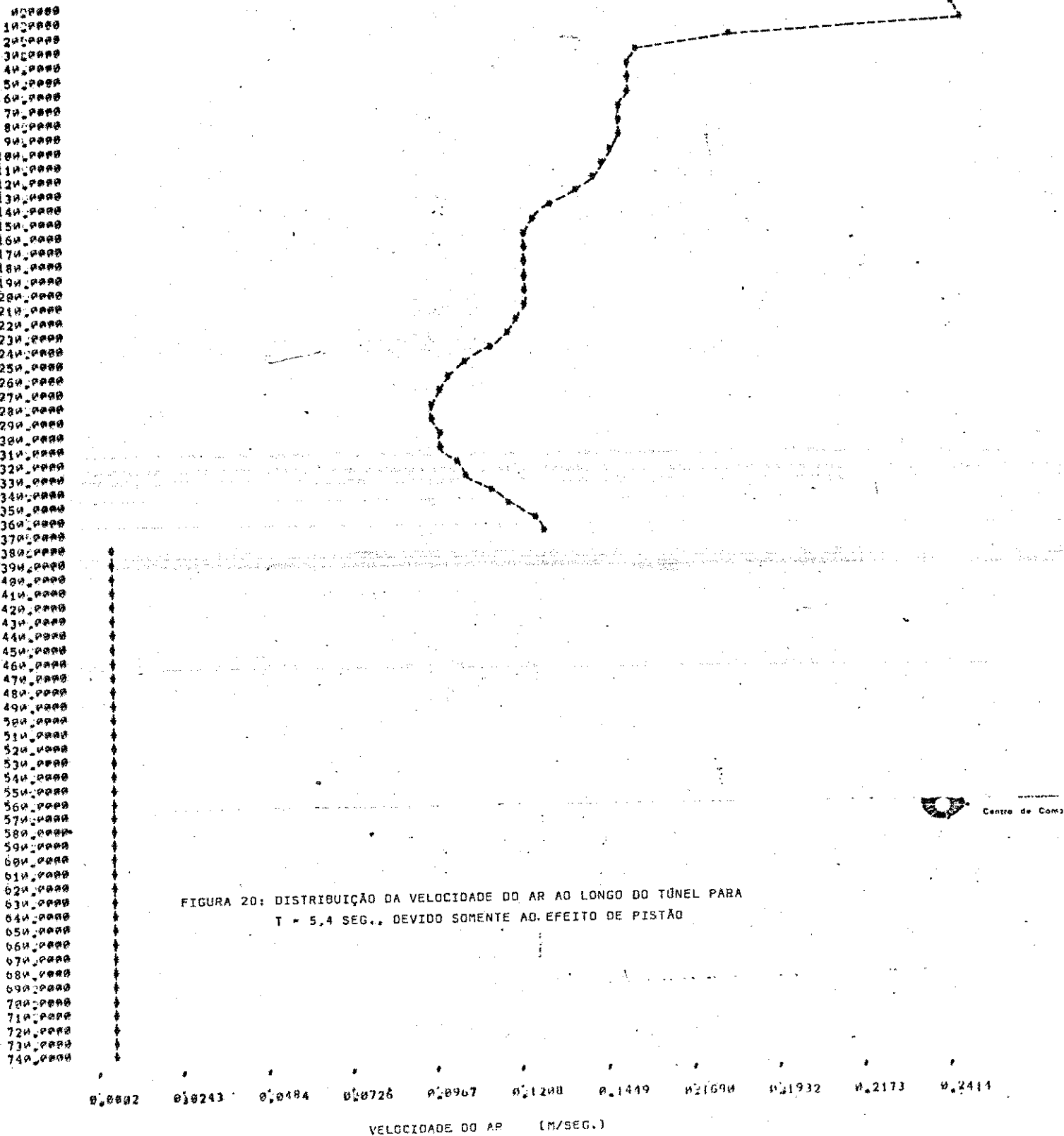


CHART 11



UNICAMP
Centro de Compu





000000
100000
200000
300000
400000
500000
600000
700000
800000
900000
1000000
1100000
1200000
1300000
1400000
1500000
1600000
1700000
1800000
1900000
2000000
2100000
2200000
2300000
2400000
2500000
2600000
2700000
2800000
2900000
3000000
3100000
3200000
3300000
3400000
3500000
3600000
3700000
3800000
3900000
4000000
4100000
4200000
4300000
4400000
4500000
4600000
4700000
4800000
4900000
5000000
5100000
5200000
5300000
5400000
5500000
5600000
5700000
5800000
5900000
6000000
6100000
6200000
6300000
6400000
6500000
6600000
6700000
6800000
6900000
7000000
7100000
7200000
7300000
7400000
7500000
7600000
7700000
7800000
7900000
8000000
8100000
8200000
8300000
8400000
8500000
8600000
8700000
8800000
8900000
9000000
9100000
9200000
9300000
9400000
9500000
9600000
9700000
9800000
9900000
10000000

FIGURA 21: DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA
T = 5,4 SEG., DEVIDO AO EFEITO DE PISTÃO MAIS VENTILAÇÃO
FORÇADA



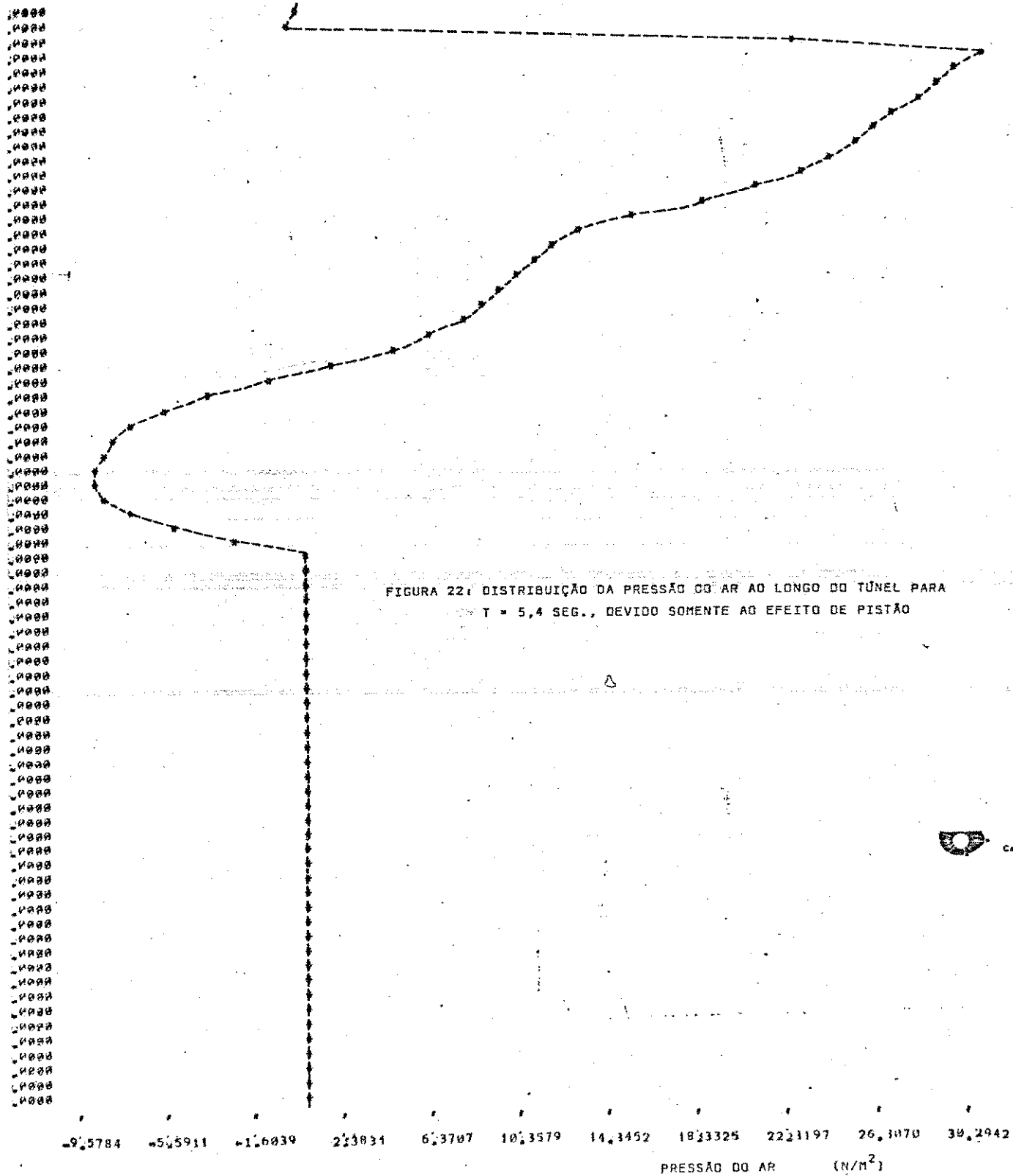
-3,1048 -2,4795 -1,8541 -1,2287 -0,6034 0,0220 0,6473 1,2727 1,8980 2,5234 3,1487

VELOCIDADE DO AR (M/SEG.)

CHART 13



UNICAMP
Centro de Computação

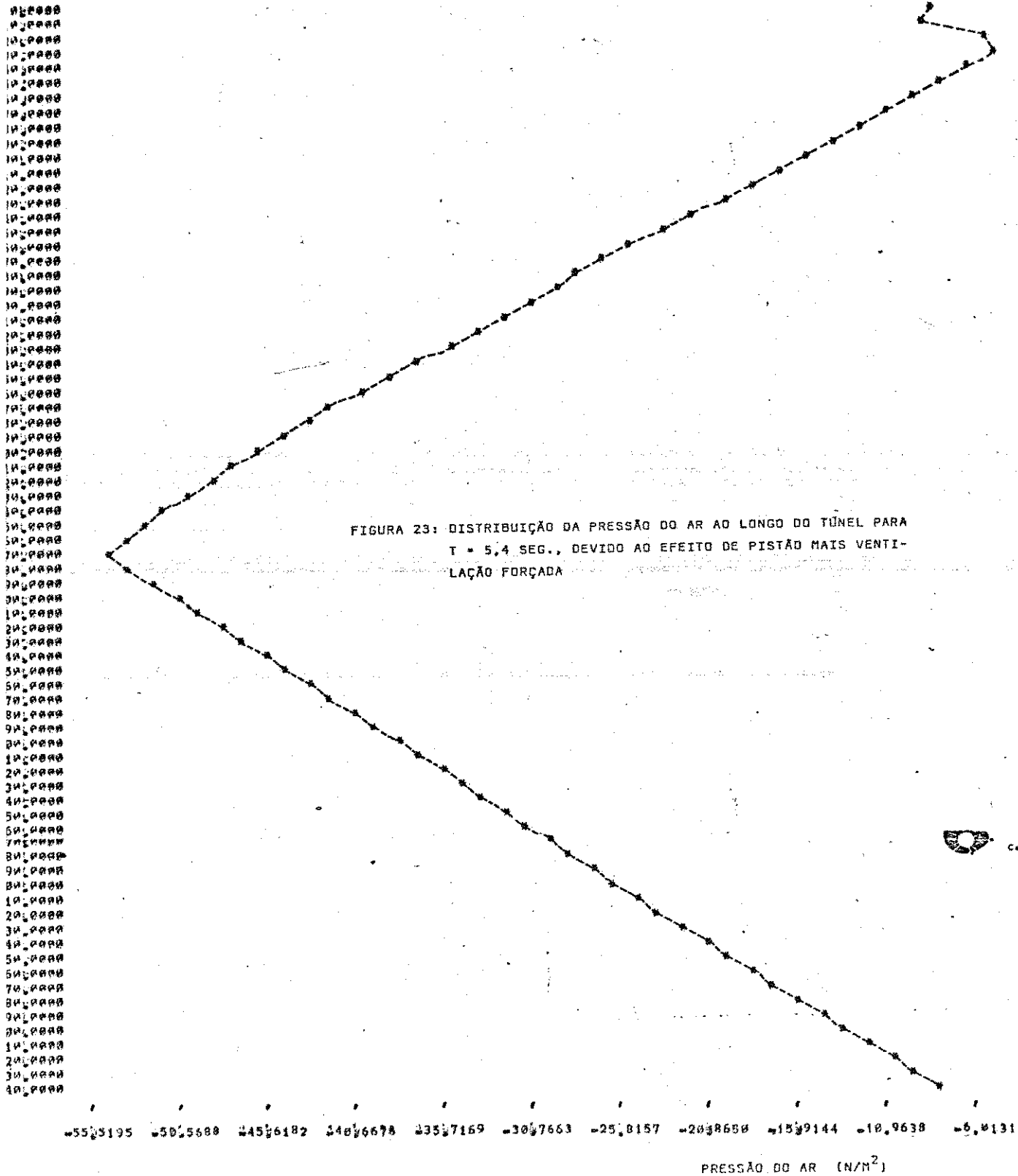


UNICAMP
Centro de Computação

CHART 12



UNICAMP
Centro de Computação

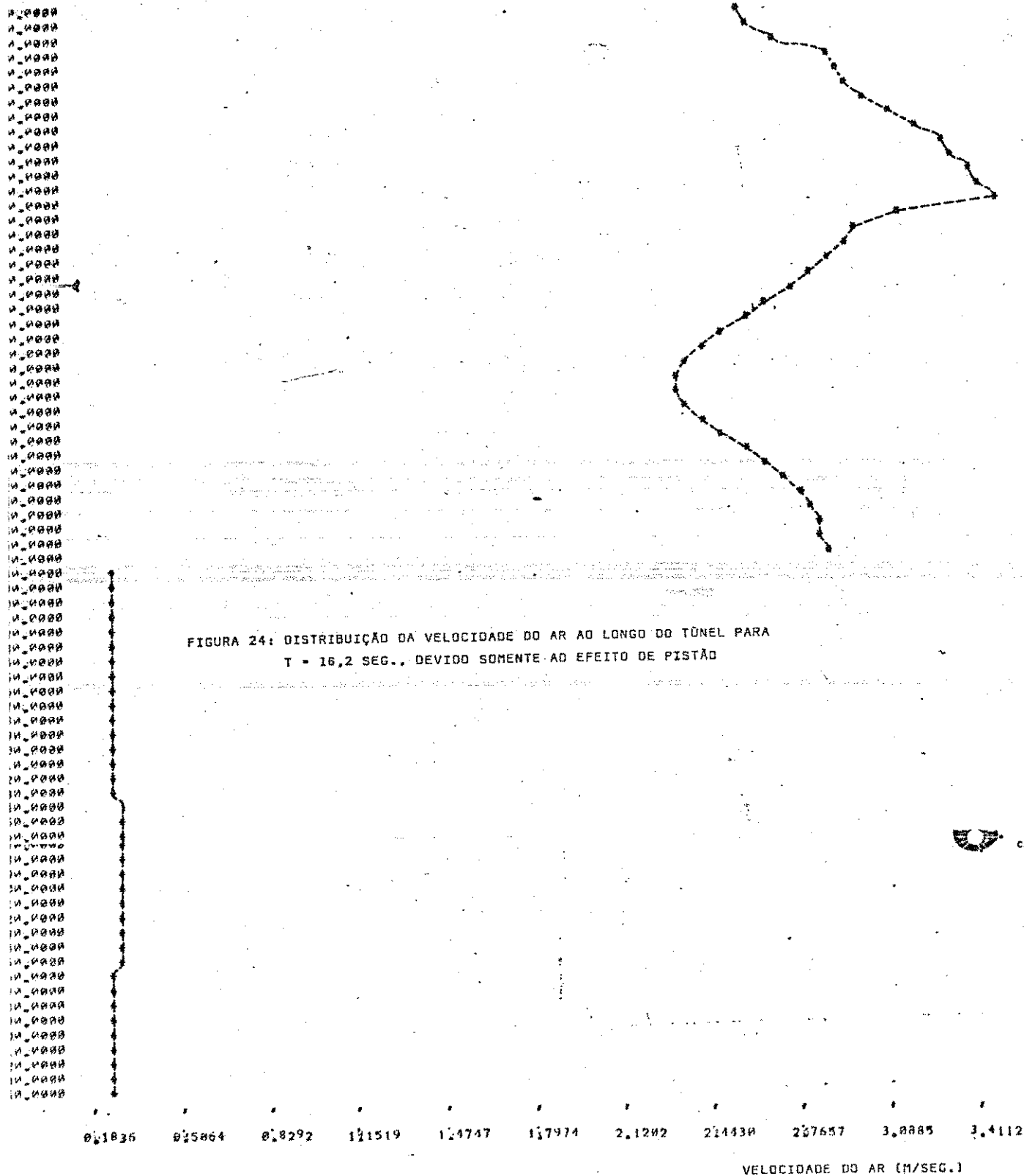


UNICAMP
Centro de Computação

CHART 16



UNICAMP
Centro de Computac



Centro de Computa

CHART 15



UNICAMP
Centro de Computaç

FIGURA 25: DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA
T = 16,2 SEG., DEVIDO AO EFEITO DE PISTÃO MAIS VENTILA-
ÇÃO FORÇADA



UNICAMP
Centro de Computaç

-2,5366 -1,8389 -1,1252 -0,4193 0,2862 0,9919 1,6976 2,4033 3,1091 3,8148 4,5205

VELOCIDADE DO AR (M/SEG.)

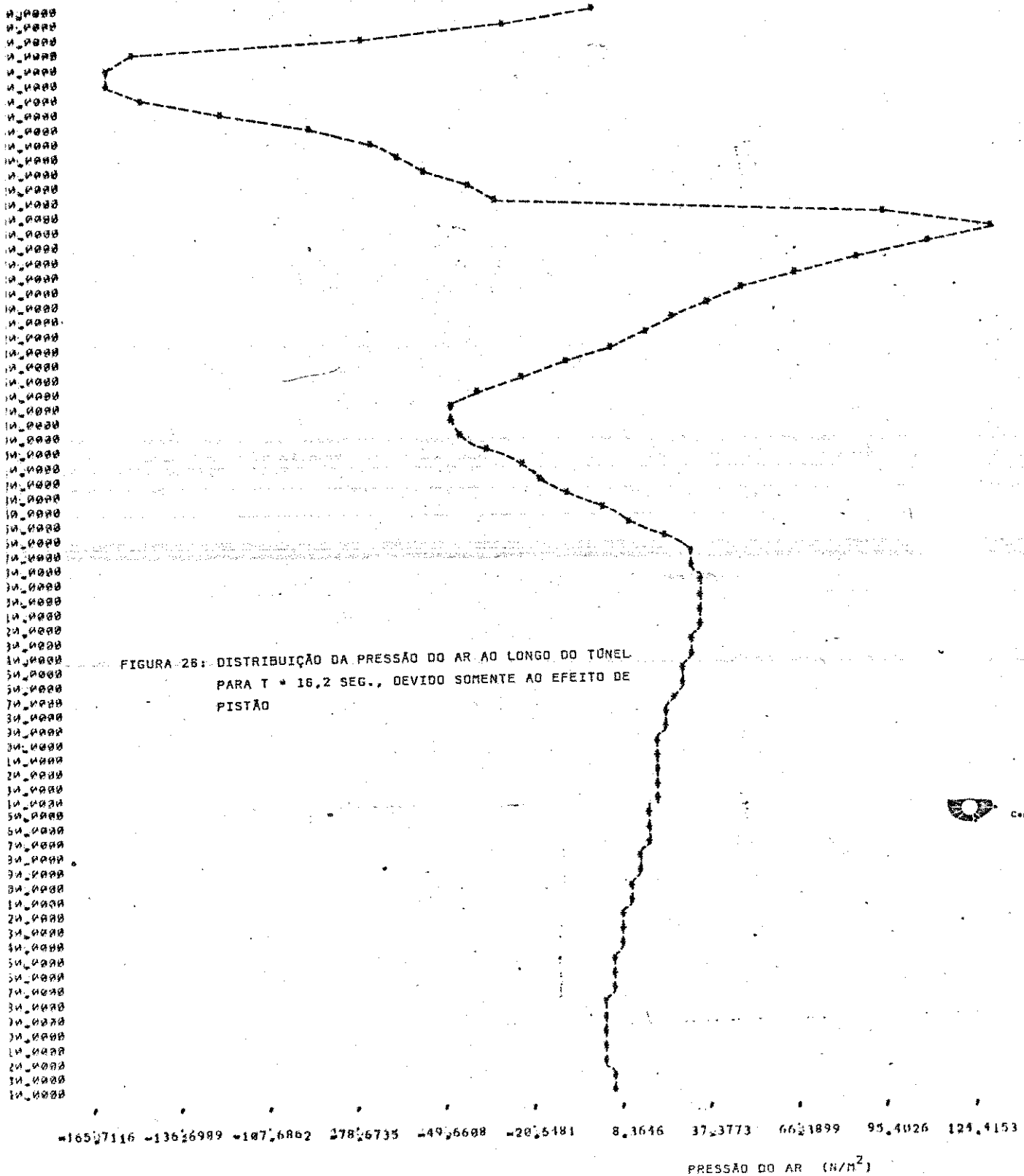


CHART 16



UNICAMP
Centro de Computação

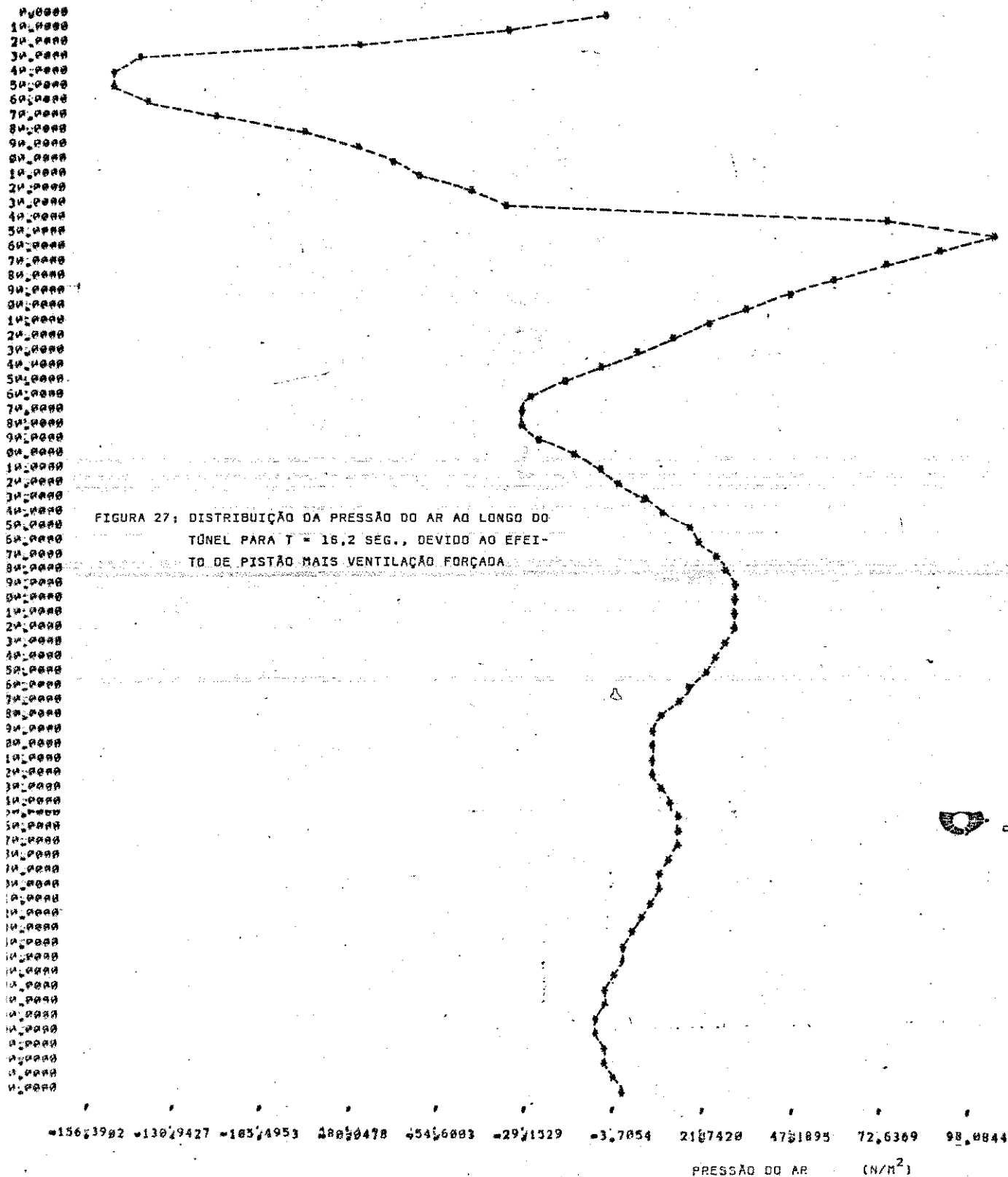


CHART 20



UNICAMP
Centro de Computação

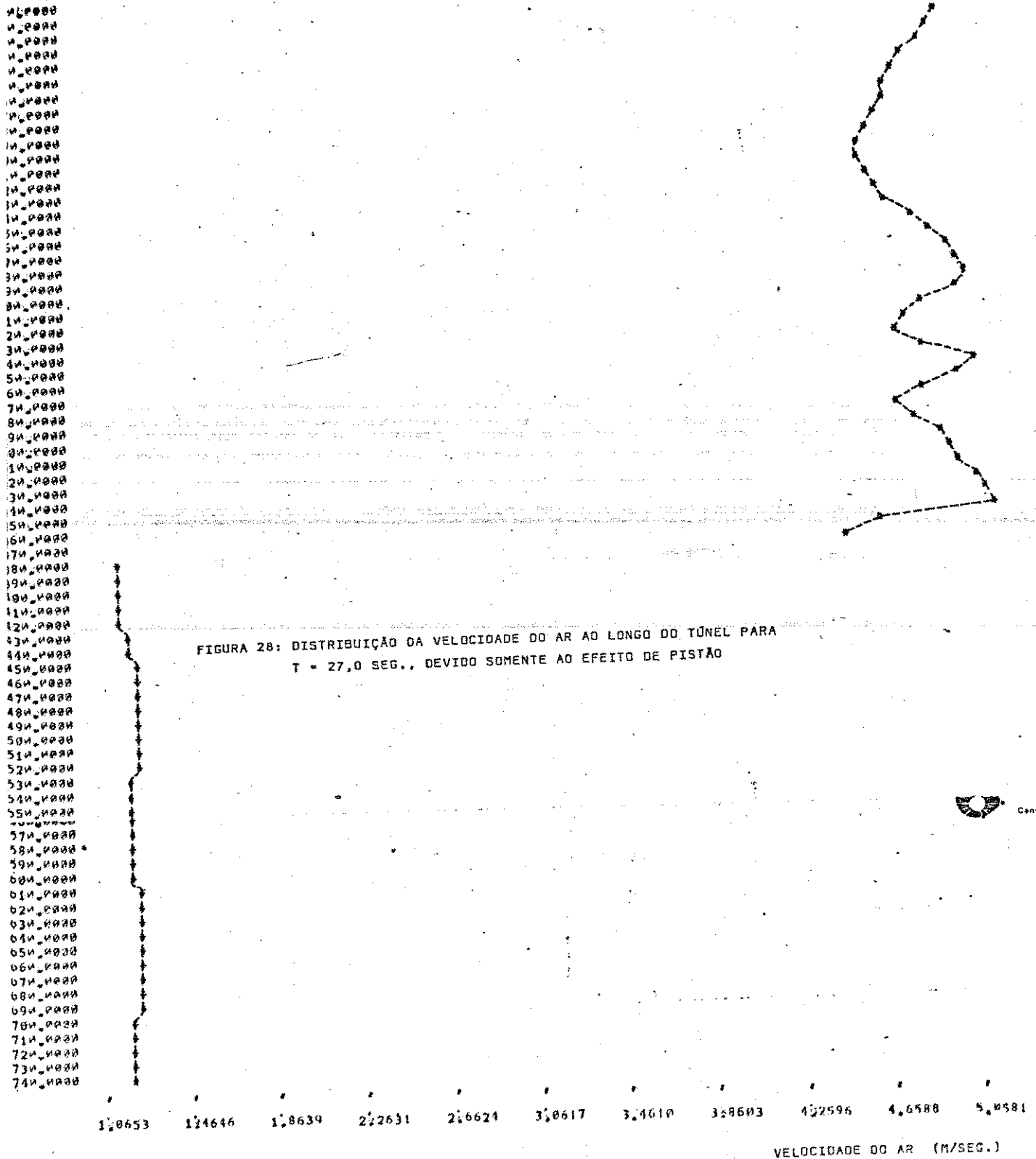
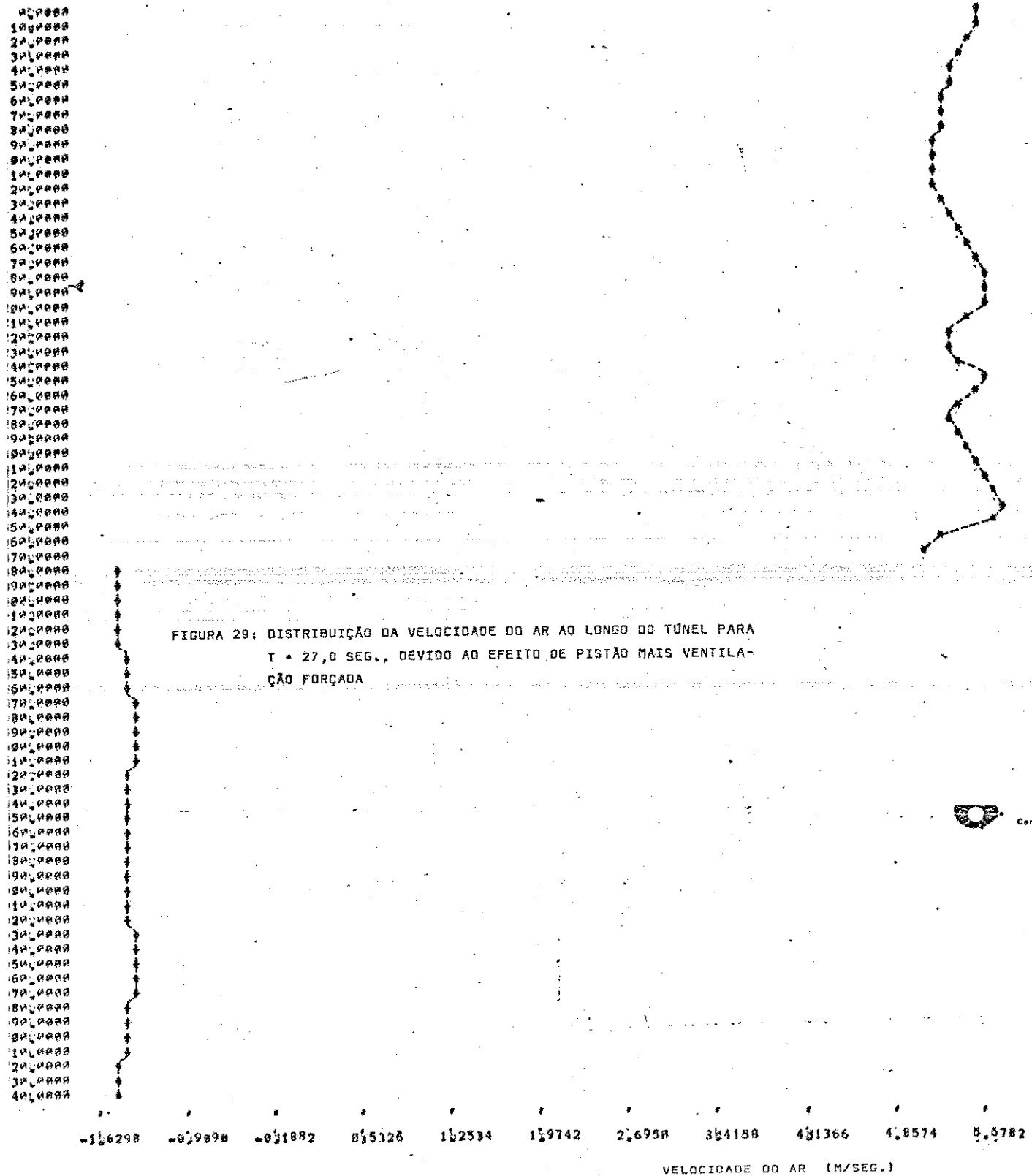


CHART 19



UNICAMP
Centro de Computação



UNICAMP
Centro de Computação

CHART 21



UNICAMP
Centro de Computação

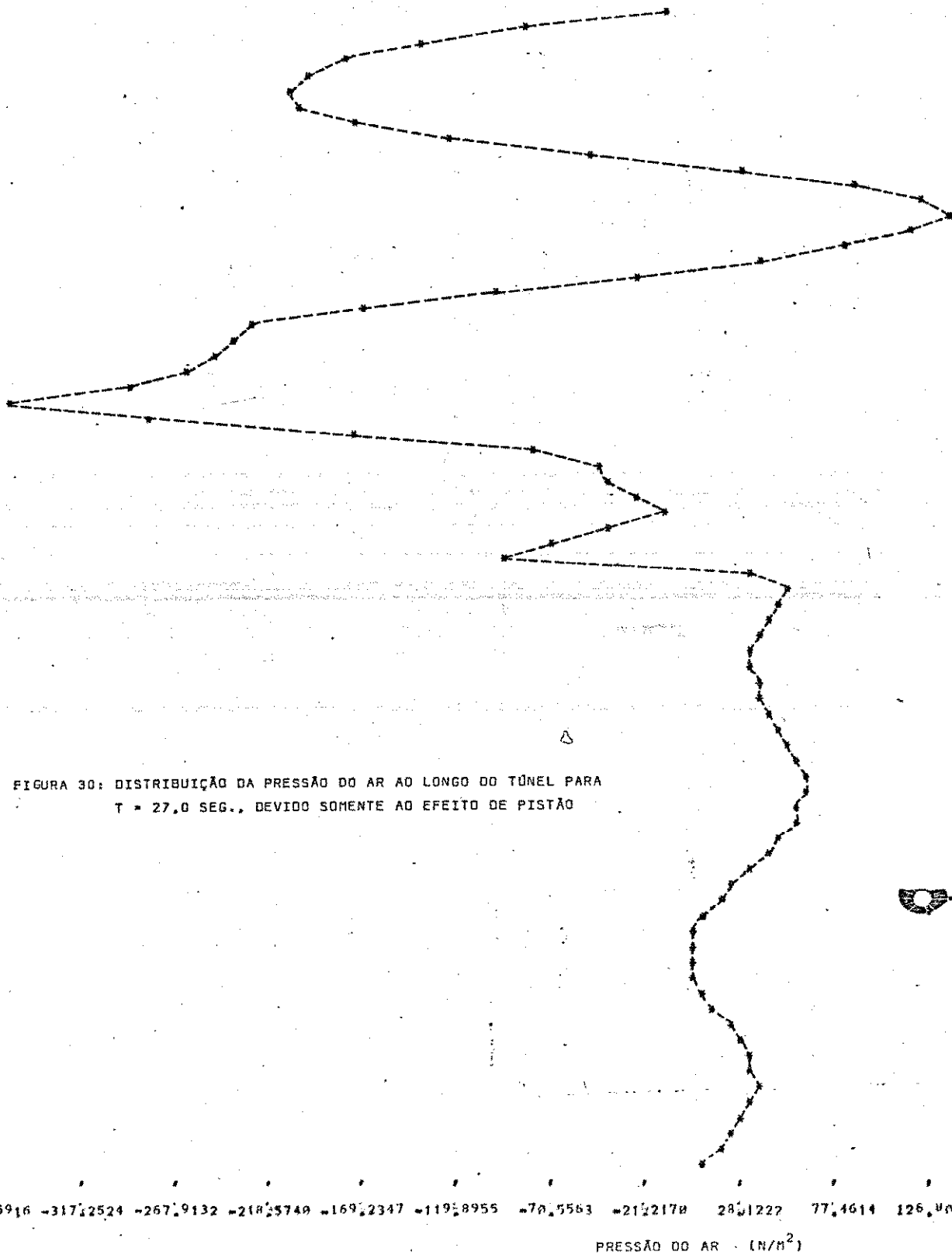


CHART 30



UNICAMP
Centro de Comput

0.0000
10.0000
20.0000
30.0000
40.0000
50.0000
60.0000
70.0000
80.0000
90.0000
100.0000
110.0000
120.0000
130.0000
140.0000
150.0000
160.0000
170.0000
180.0000
190.0000
200.0000
210.0000
220.0000
230.0000
240.0000
250.0000
260.0000
270.0000
280.0000
290.0000
300.0000
310.0000
320.0000
330.0000
340.0000
350.0000
360.0000
370.0000
380.0000
390.0000
400.0000
410.0000
420.0000
430.0000
440.0000
450.0000
460.0000
470.0000
480.0000
490.0000
500.0000
510.0000
520.0000
530.0000
540.0000
550.0000
560.0000
570.0000
580.0000
590.0000
600.0000
610.0000
620.0000
630.0000
640.0000
650.0000
660.0000
670.0000
680.0000
690.0000
700.0000
710.0000
720.0000
730.0000
740.0000

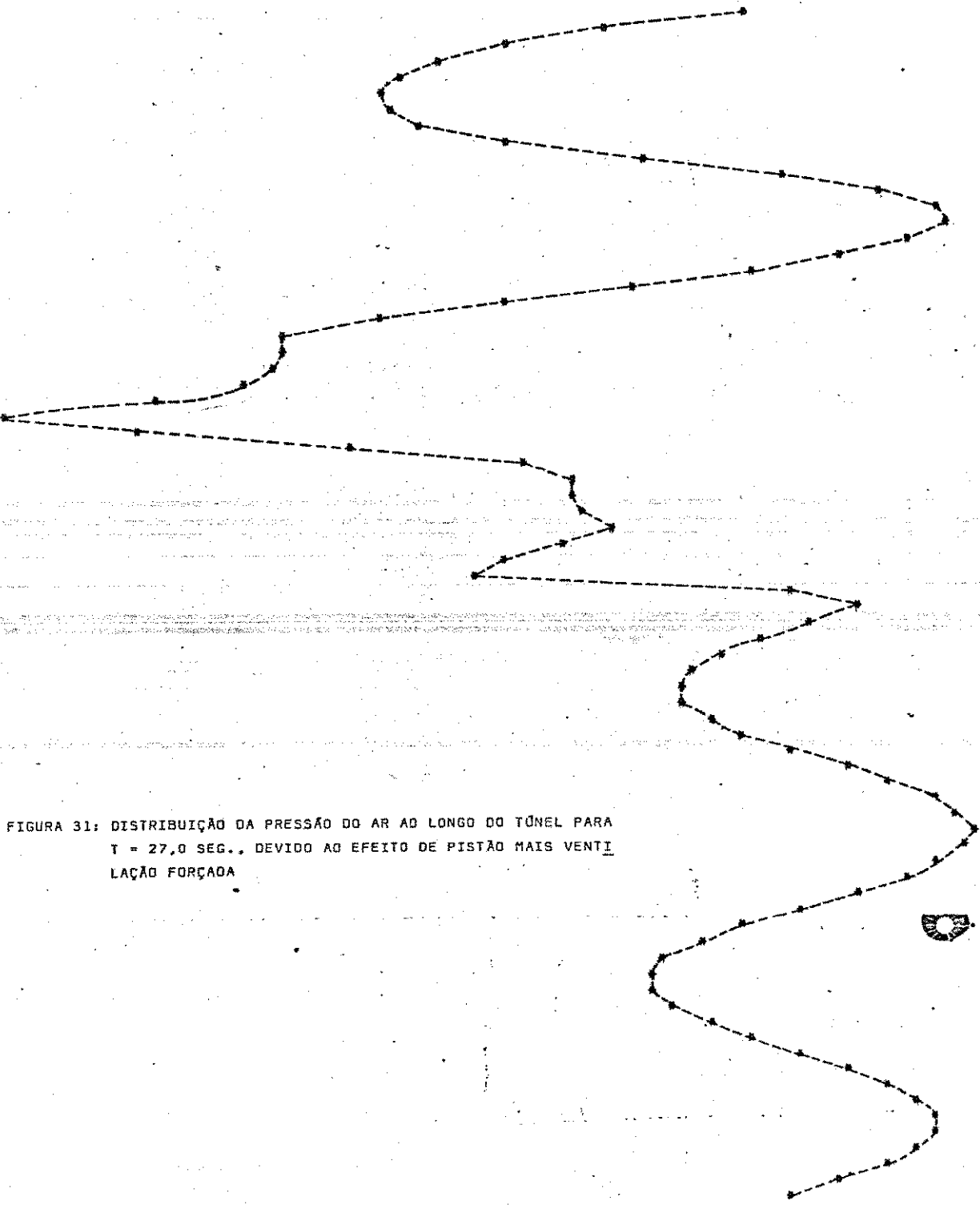


FIGURA 31: DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA
T = 27,0 SEG., DEVIDO AO EFEITO DE PISTÃO MAIS VENTIL
LAÇÃO FORÇADA



UNICAMP
Centro de Comput

-4334.3500 -2930.6776 -2530.0052 -2122.3328 -1711.6604 -1300.9880 -90.3156 -49.6432 0.9700 31.7016 72.3740
PRESSÃO DO AR (N/M²)

CHART 23



UNICAMP
Centro de Comp

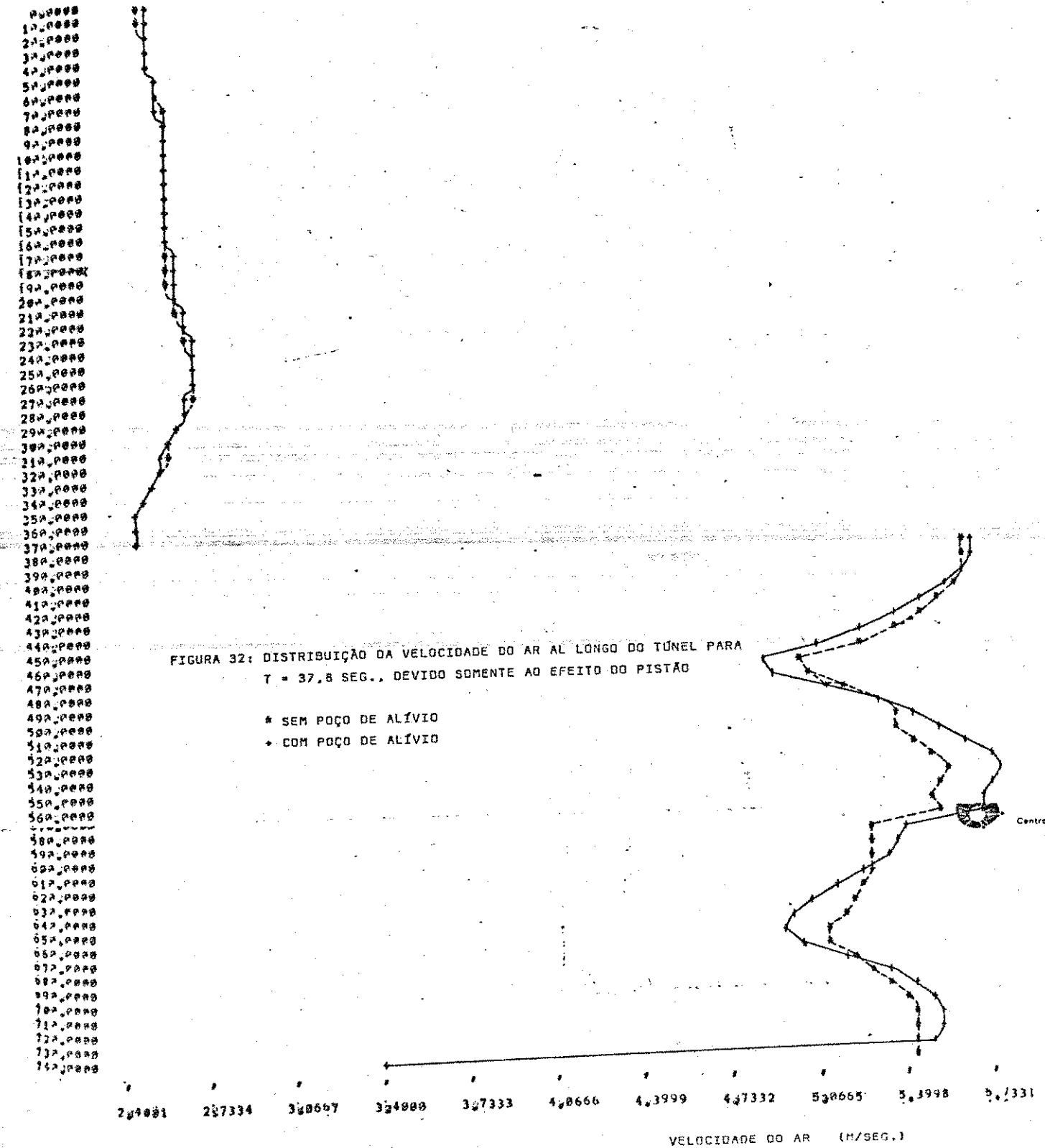


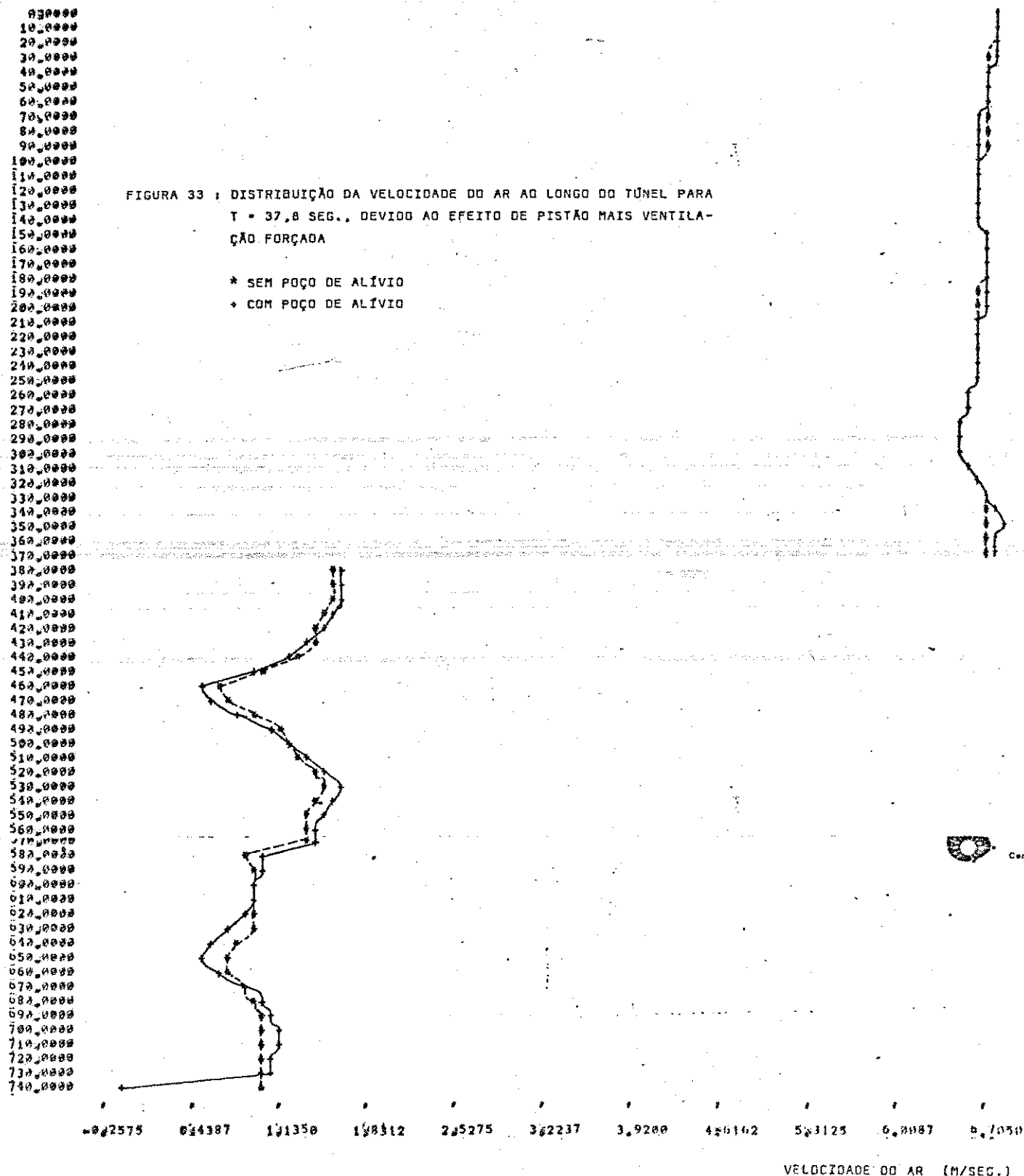
CHART 23



UNICAMP
Centro de Comp.

FIGURA 33 : DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA
T = 37,8 SEG., DEVIDO AO EFEITO DE PISTÃO MAIS VENTILA-
ÇÃO FORÇADA

- * SEM POÇO DE ALÍVIO
- + COM POÇO DE ALÍVIO



UNICAMP
Centro de Comp.

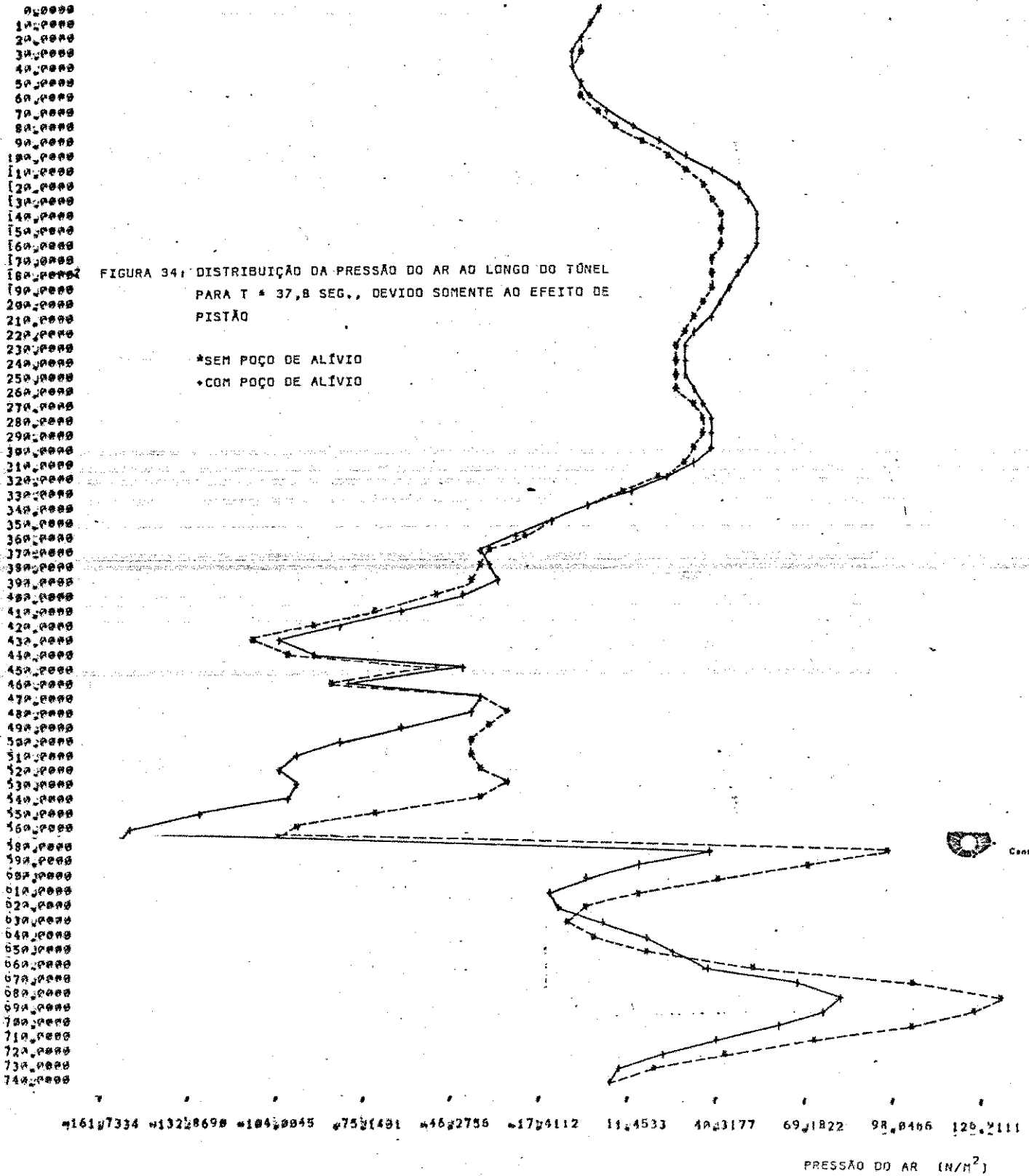
CHART 24



UNICAMP
Centro de Comp.

FIGURA 34: DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO DO AR AO LONGO DO TÚNEL
PARA $t = 37,8$ SEG., DEVIDO SOMENTE AO EFEITO DE
PISTÃO

*SEM POÇO DE ALÍVIO
♦COM POÇO DE ALÍVIO

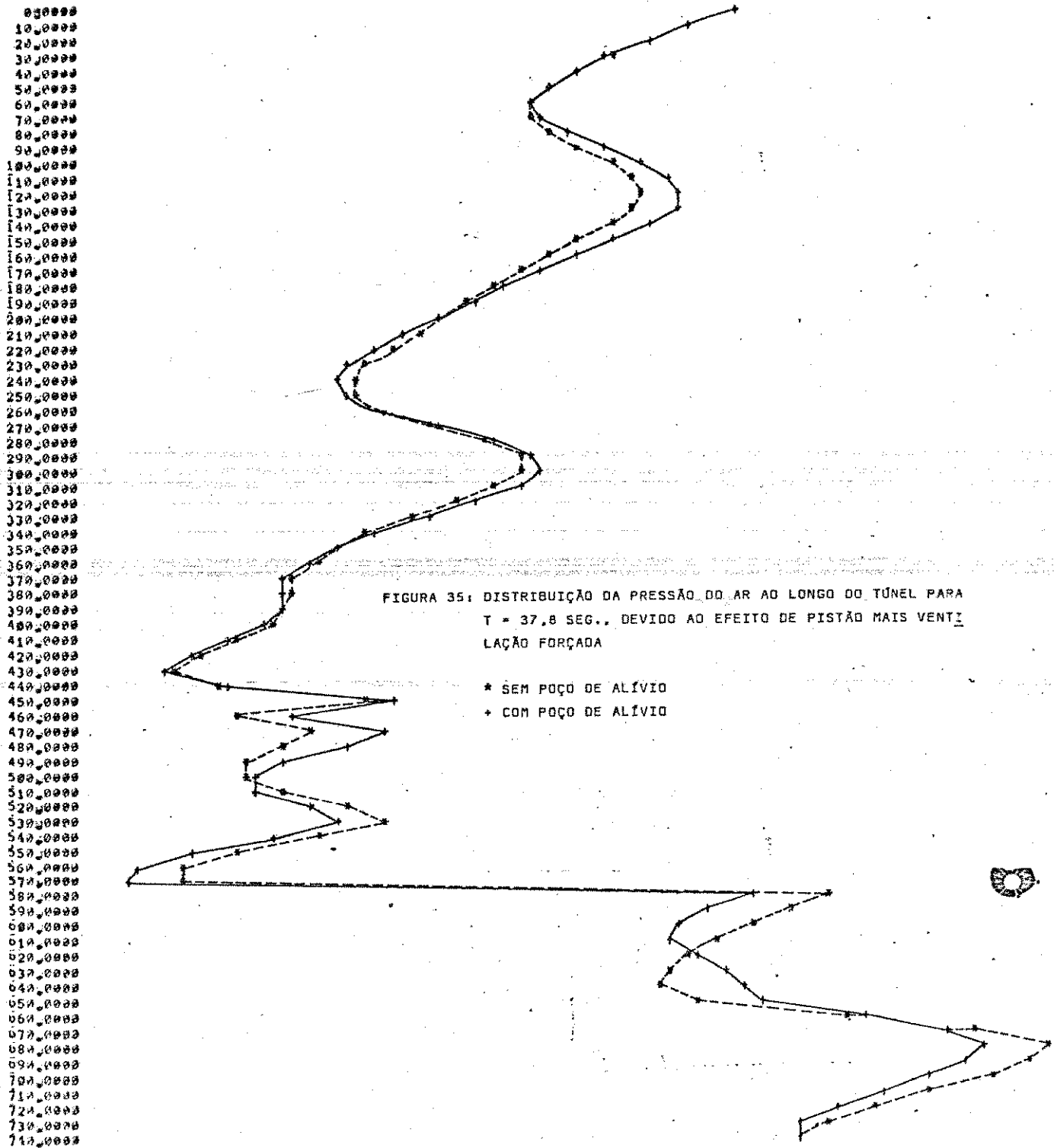


UNICAMP
Centro de Comp.

CHART 24



UNICAMP
Centro de Comput



UNICAMP
Centro de Comput

389,0369 336,2822 283,3674 232,5327 177,6979 124,8632 72,8284 19,1937 33,0410 80,4758 139,3108

PRESSÃO DO AR (N/M²)



FIGURA 35: DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA
T = 48,6 SEG., DEVIDO SOMENTE AO EFEITO DE PISTÃO

* SEM POÇO DE ALÍVIO
+ COM POÇO DE ALÍVIO

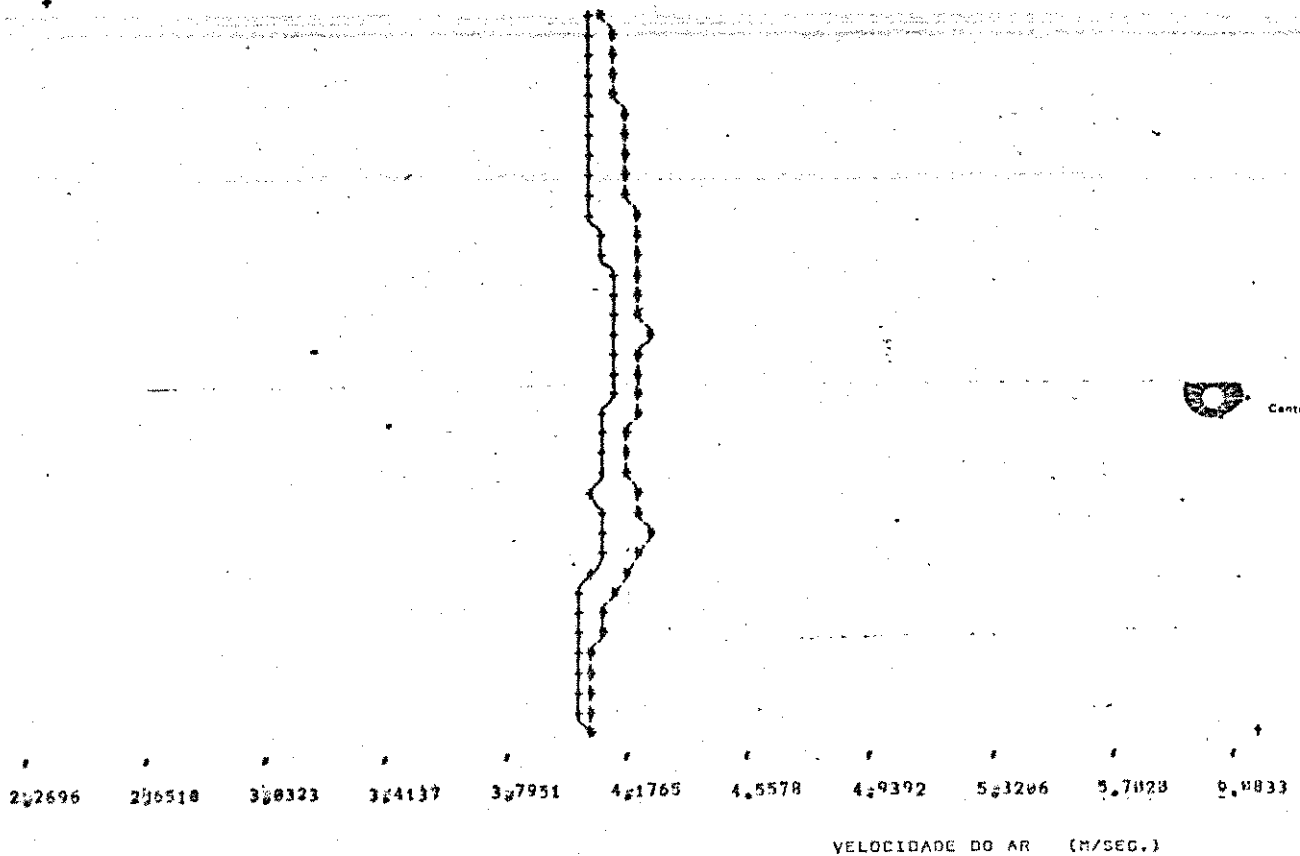
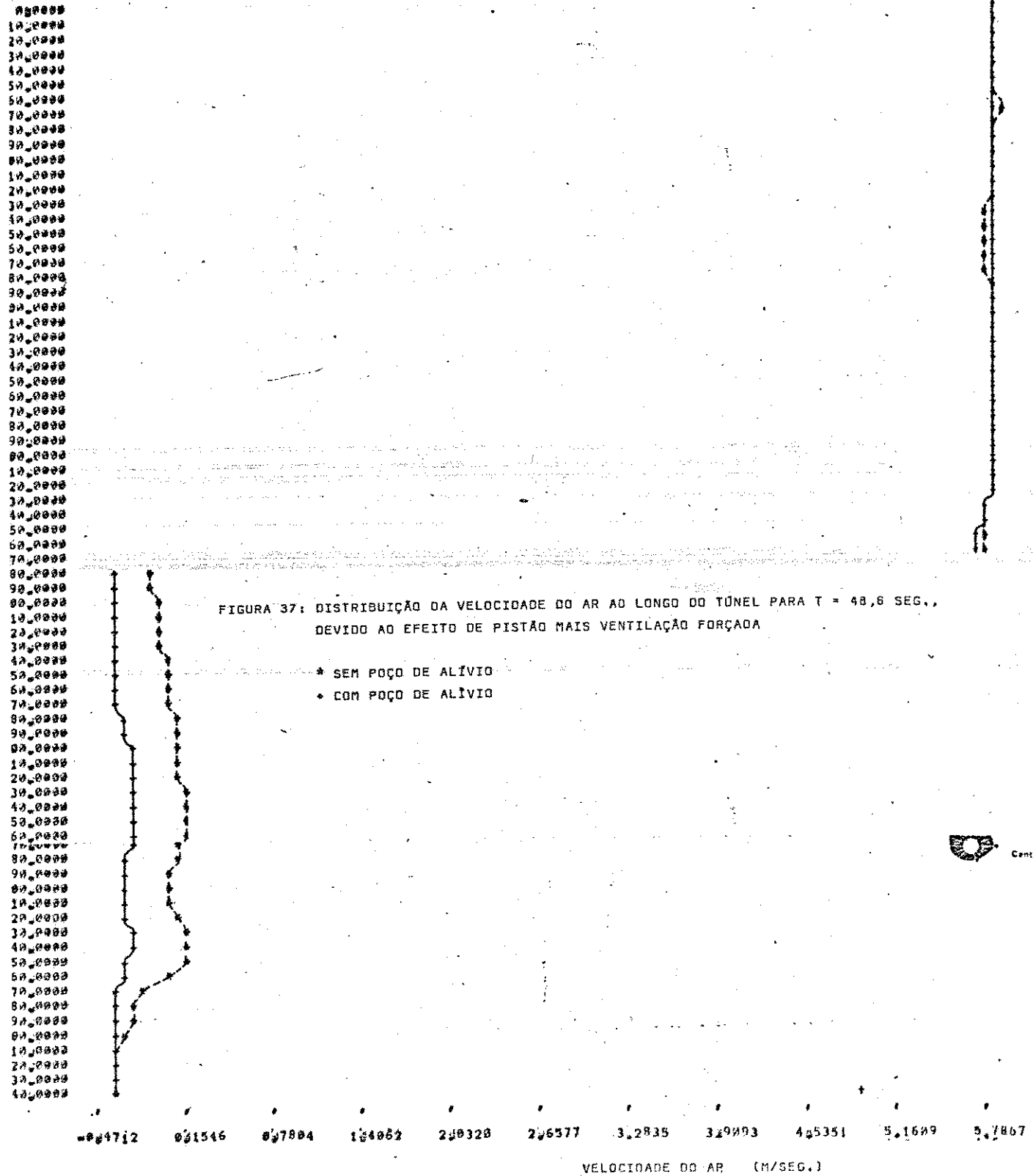


CHART 27



UNICAMP
Centro de Computação



UNICAMP
Centro de Computação



FIGURA 38: DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO DO AR AO LONGO DO TÚNEL
PARA $T = 48,6$ SEG., DEVIDO SOMENTE AO EFEITO DE
PISTÃO

*SEM POÇO-DE ALÍVIO
+COM POÇO-DE ALÍVIO

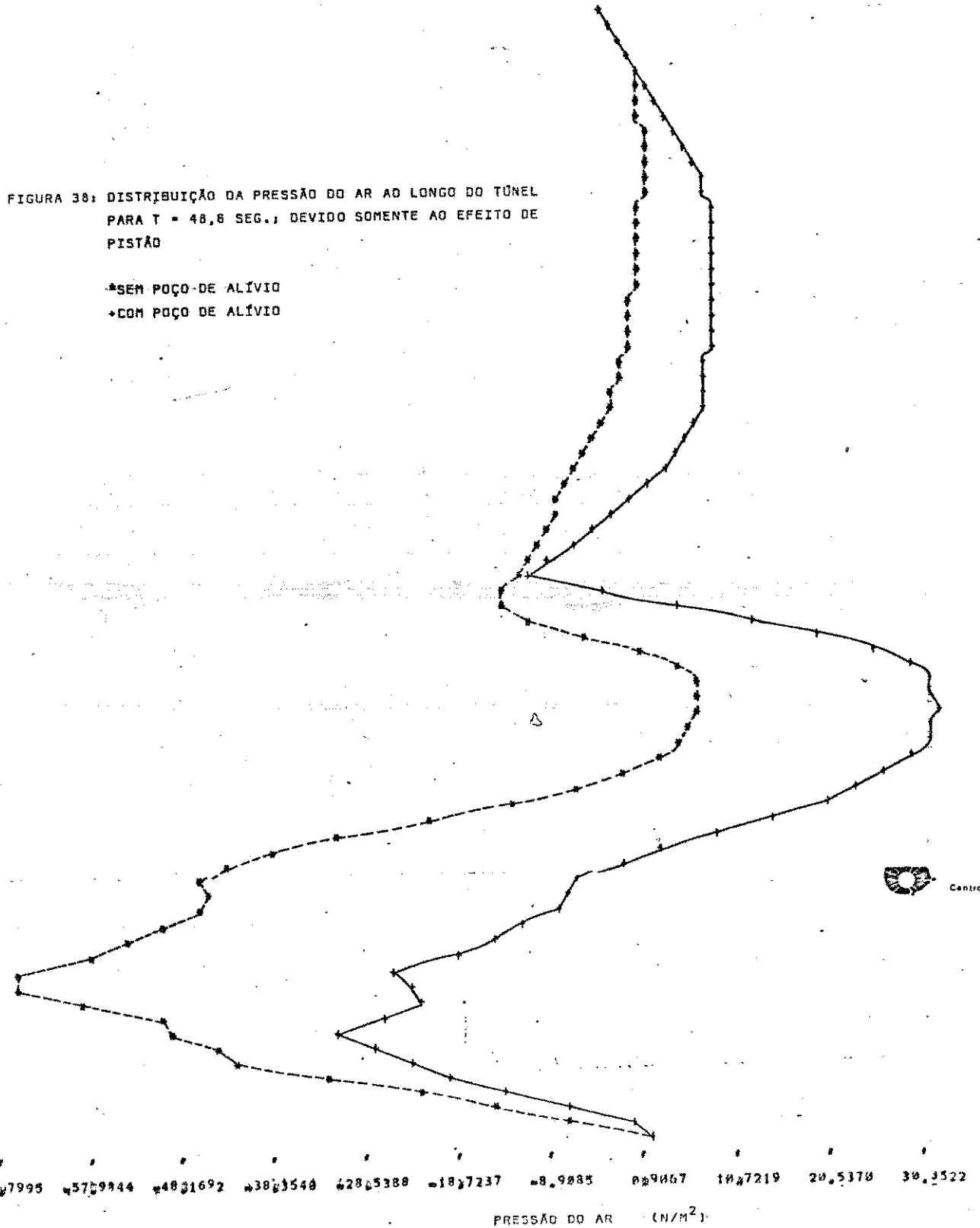


CHART 28



UNICAMP
Centro de Computação

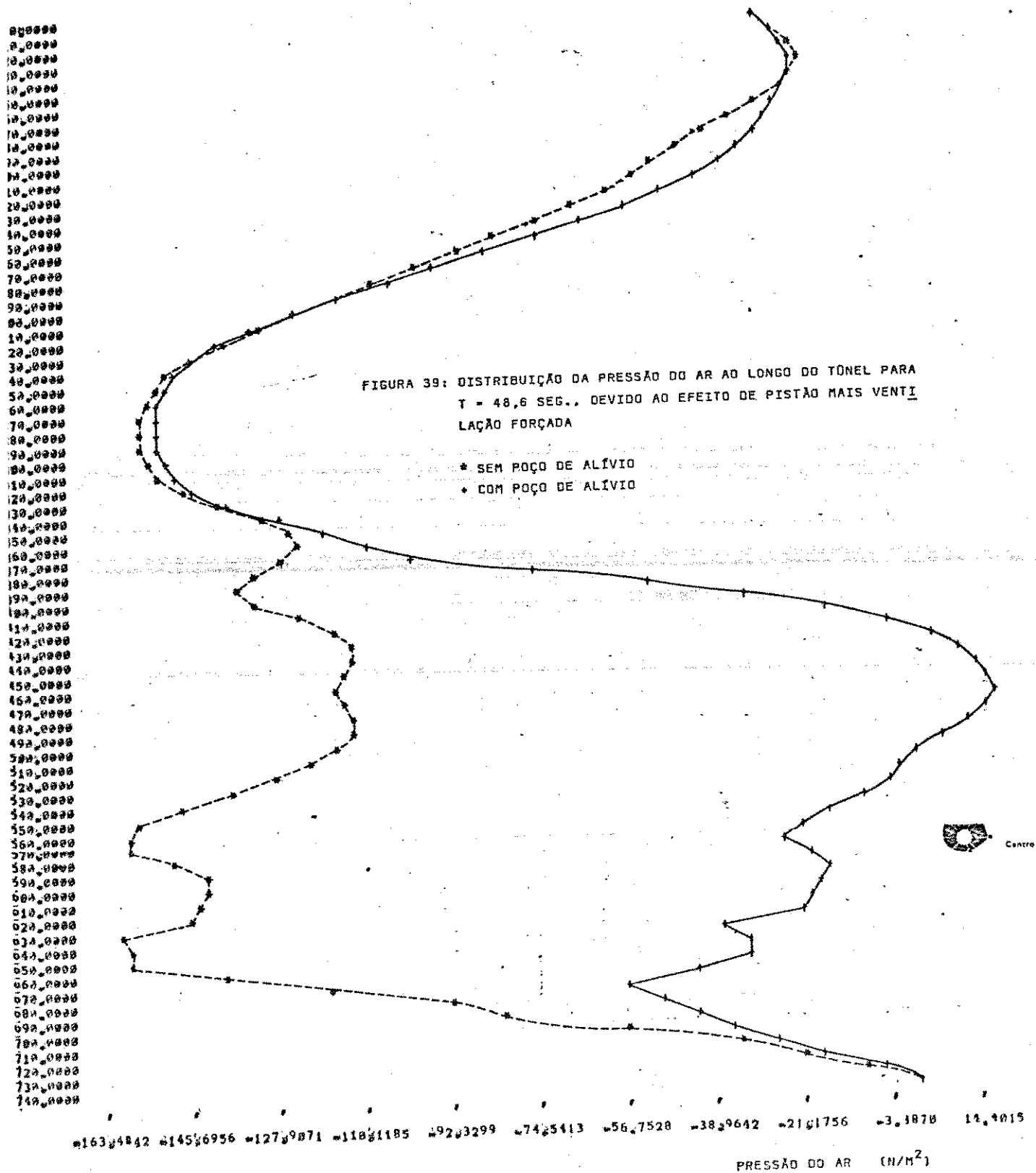


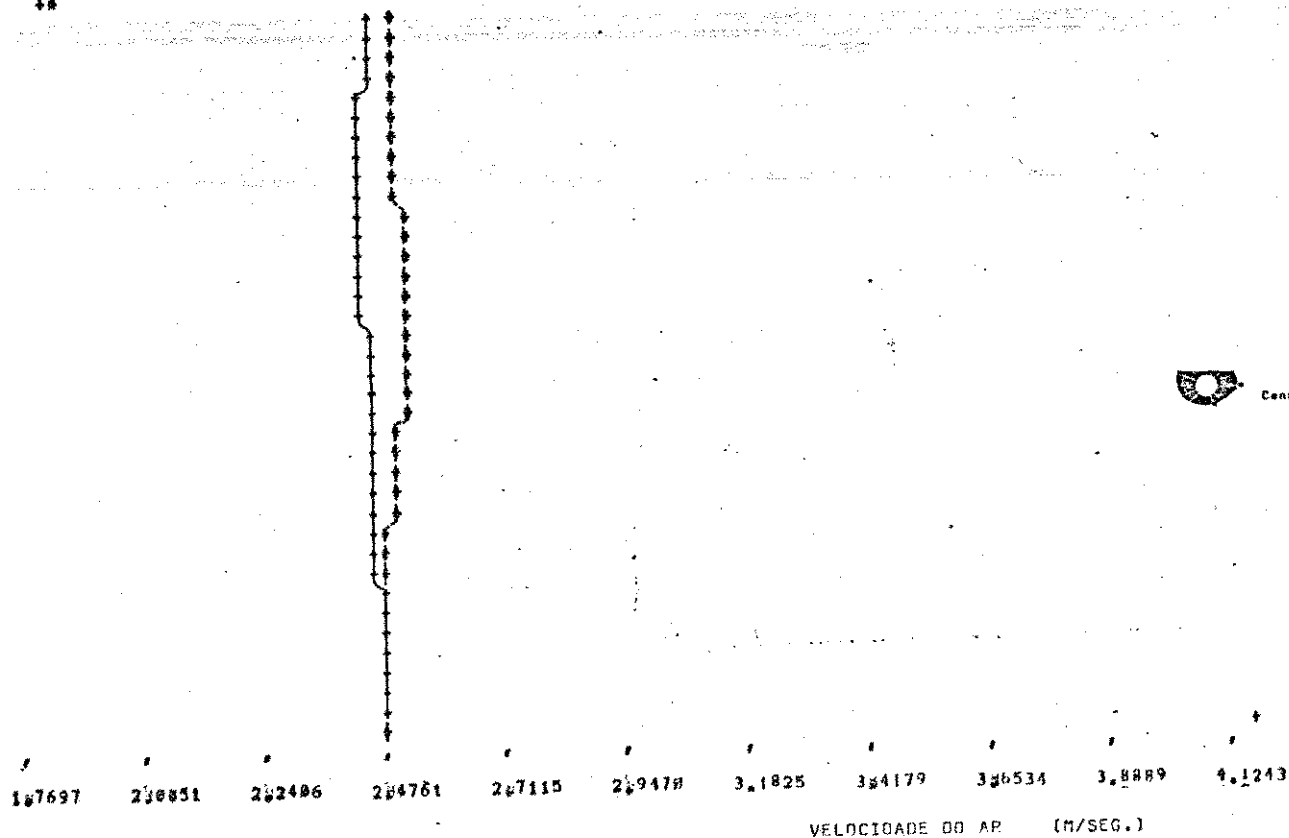
CHART 31



UNICAMP
Centro de Computação

FIGURA 40: DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR AO LONGO DO TÚNEL
PARA $T = 59,4$ SEG., DEVIDO SOMENTE AO EFEITO DE
PISTÃO

- * SEM POÇO DE ALÍVIO
- * COM POÇO DE ALÍVIO

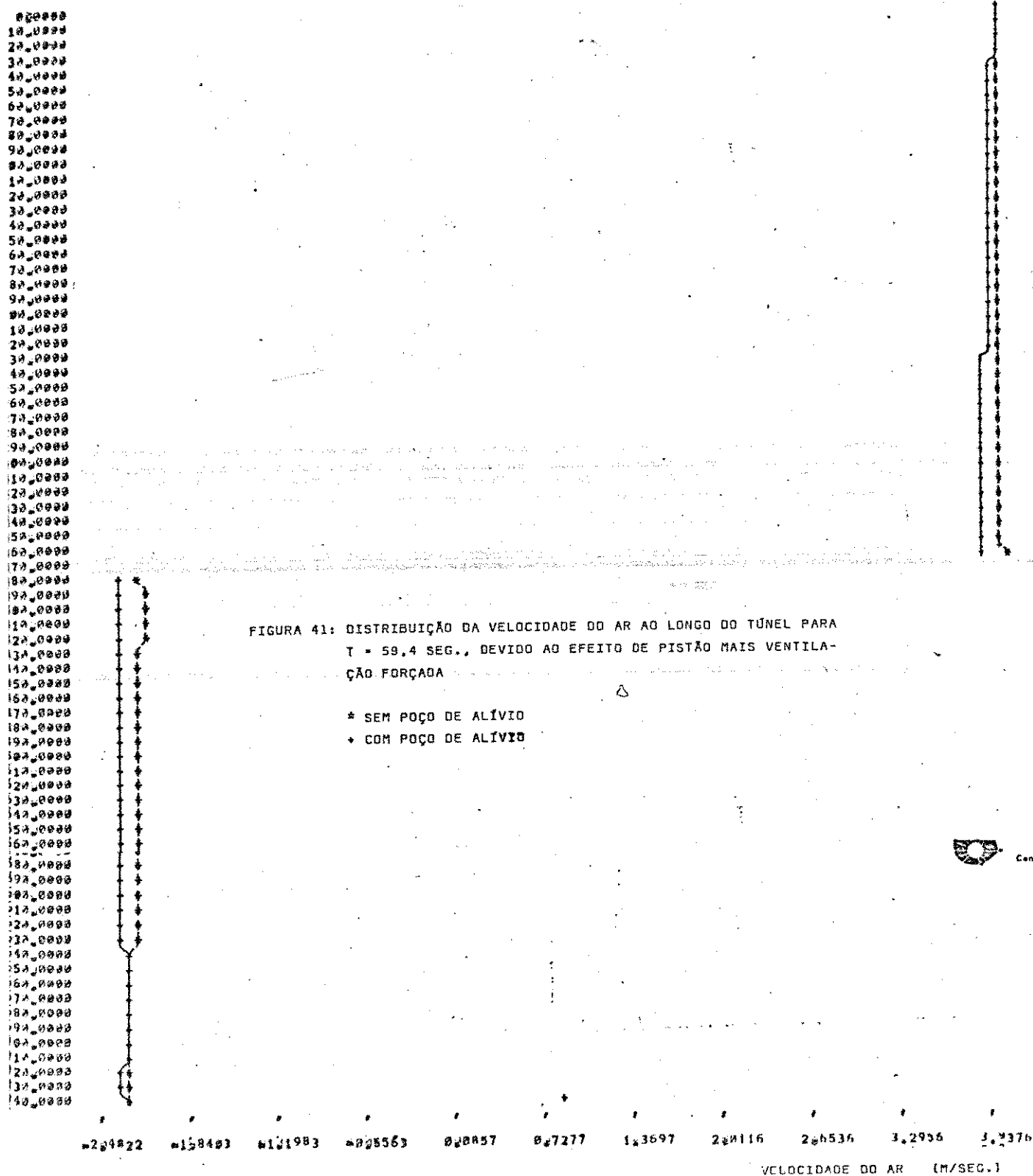


UNICAMP
Centro de Computação

CHART 31



UNICAMP
Centro de Computação



* SEM POÇO DE ALÍVIO
+ COM POÇO DE ALÍVIO

UNICAMP
Centro de Computac

VELOCIDADE DO AR (M/SEC.)

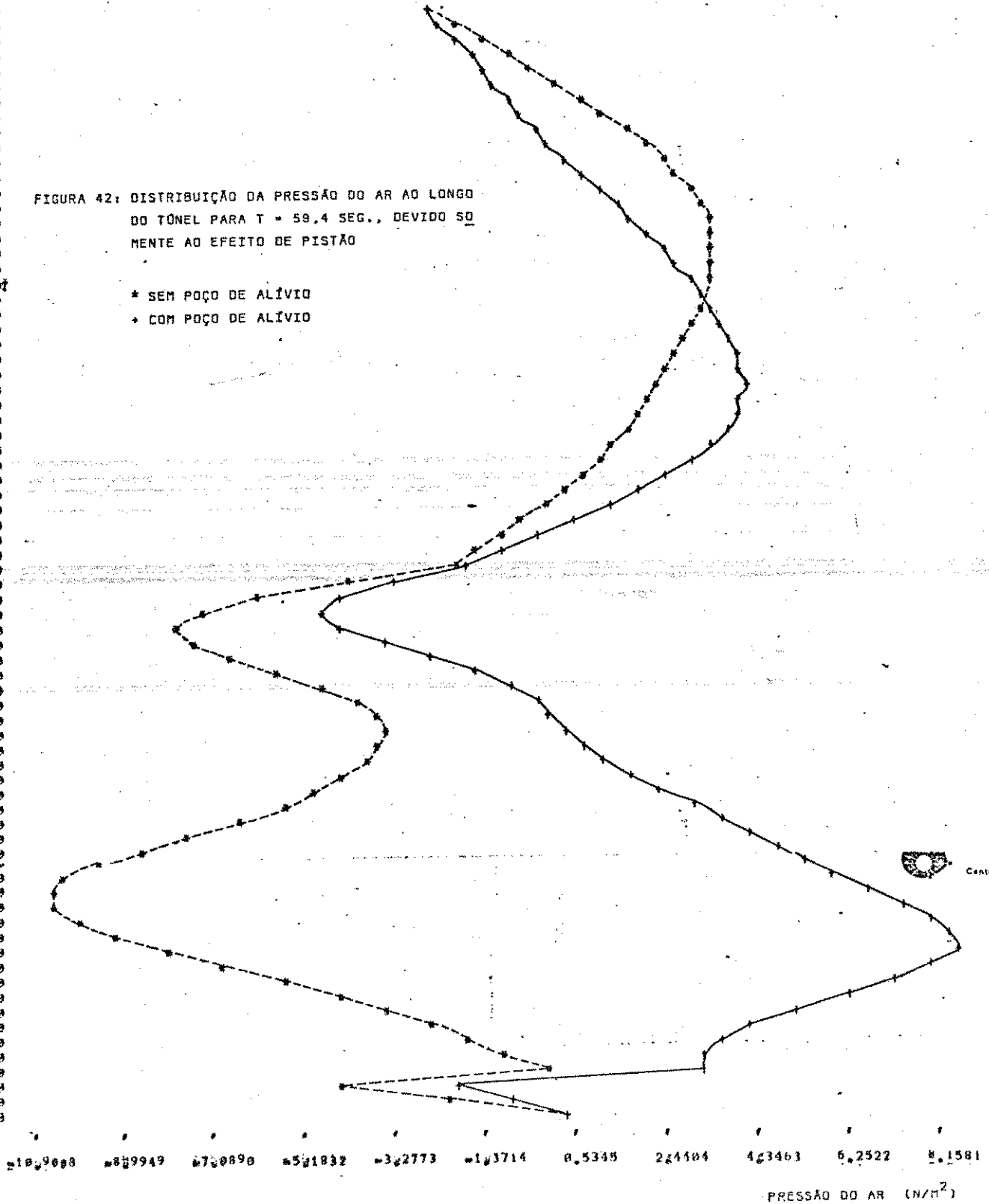
CHART 32



UNICAMP
Centro de Computação

FIGURA 42: DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA $T = 59.4$ SEG., DEVIDO SO MENTE AO EFEITO DE PISTÃO

- * SEM POÇO DE ALÍVIO
- + COM POÇO DE ALÍVIO



UNICAMP
Centro de Computação

CHART 32



UNICAMP
Centro de Comput.

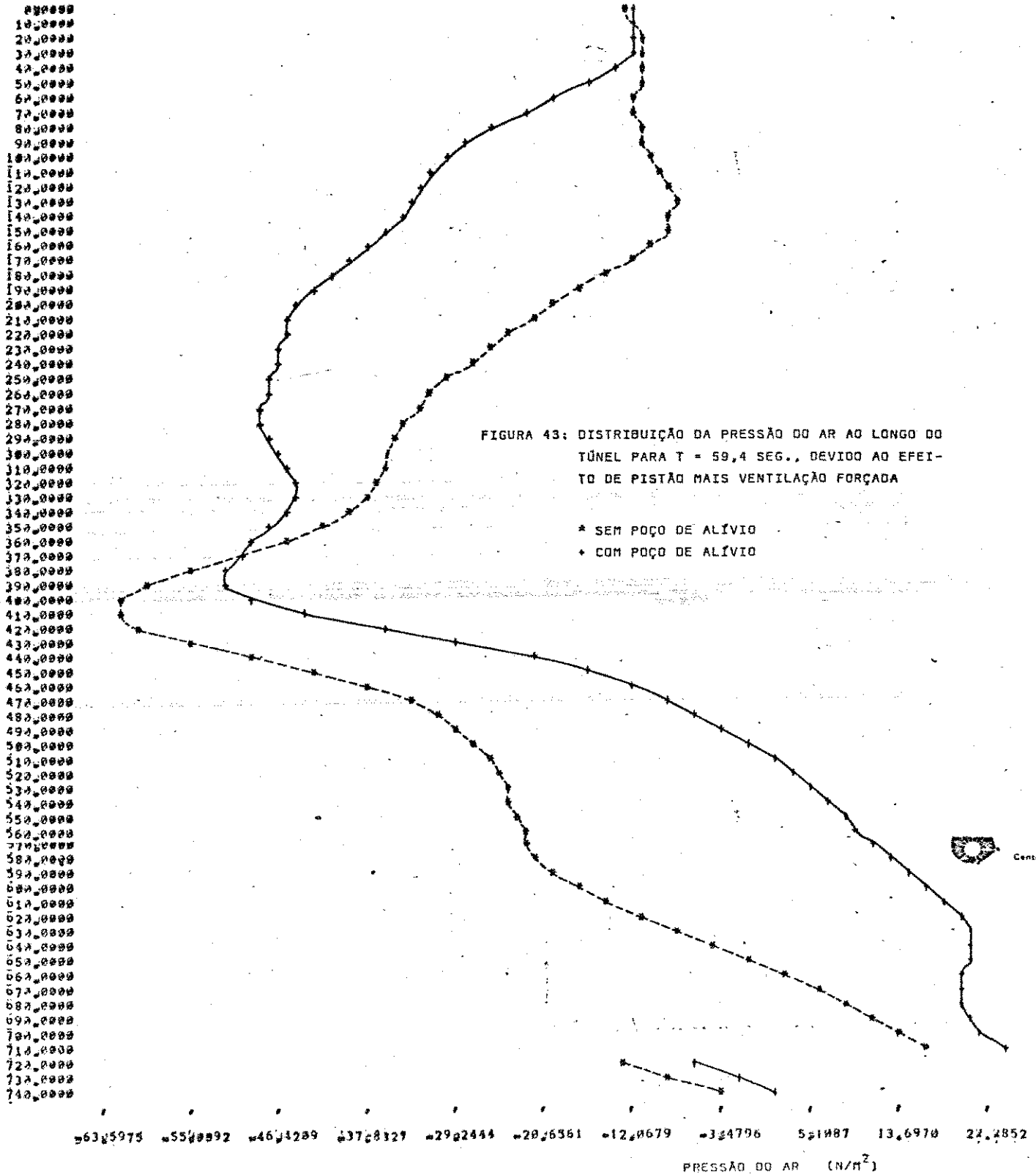


CHART 35



UNICAMP
Centro de Computac

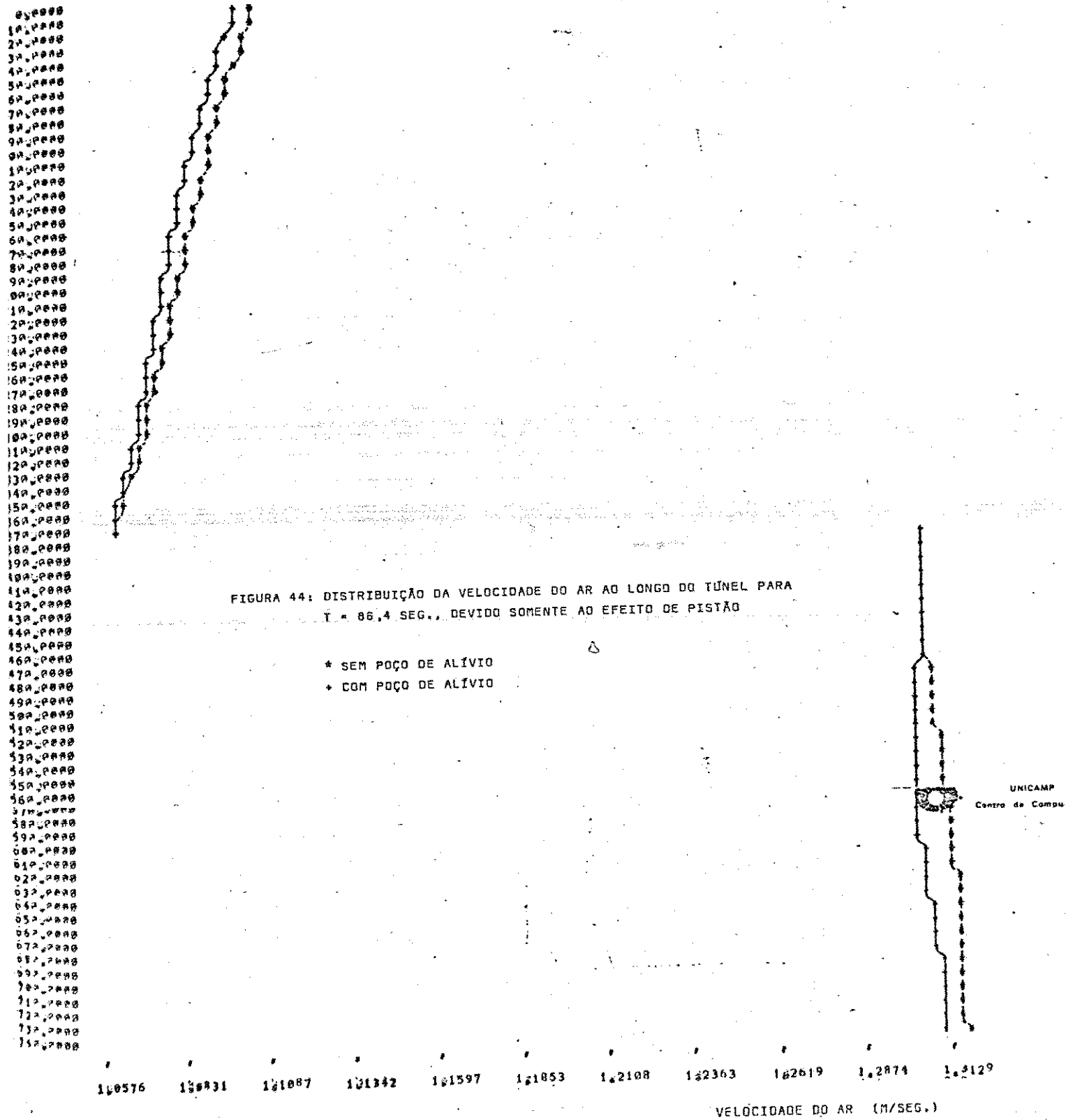


CHART 35

UNICAMP
Centro de Comput

FIGURA 45: DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA
T = 86,4 SEG., DEVIDO AO EFEITO DE PISTÃO MAIS VENTILA-
ÇÃO FORÇADA

- * SEM POÇO DE ALÍVIO
- * COM POÇO DE ALÍVIO

UNICAMP
Centro de Comput

-321143 -204714 -1120284 -111855 -025426 021004 027433 123862 200292 2.6721 3.3150

VELOCIDADE DO AR (M/SEG.)

CHART 36



UNICAMP
Centro de Computação

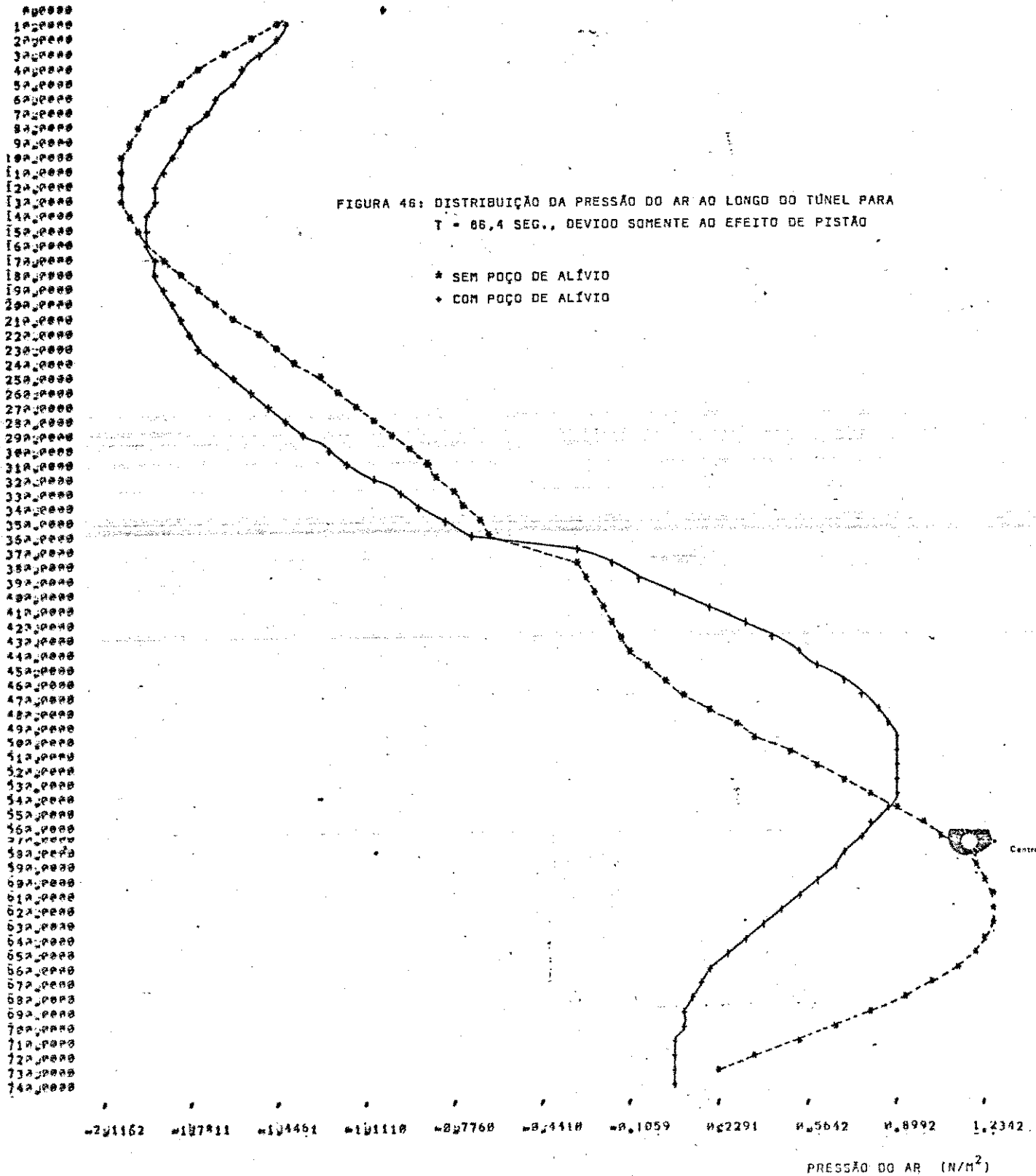


CHART 36



UNICAMP
Centro de Computação

FIGURA 47: DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA
T = 86,4 SEG., DEVIDO AO EFEITO DE PISTÃO MAIS VENTILAÇÃO FORÇADA

* SEM POÇO DE ALÍVIO
+ COM POÇO DE ALÍVIO



UNICAMP
Centro de Computação

58,33575 53,24016 48,44456 43,48898 38,53336 33,5776 28,6217 23,6657 18,7097 13,7537 8,7977
PRESSÃO DO AR (N/M²)

CHART 39



UNICAMP
Centro de Comput

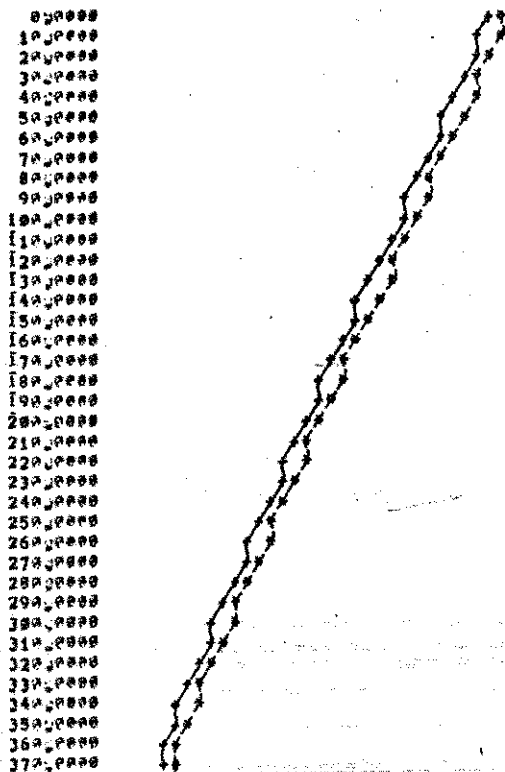


FIGURA 48: DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA
T = 129,6 SEG., DEVIDO SOMENTE AO EFEITO DE PISTÃO

- * SEM POÇO DE ALÍVIO
- + COM POÇO DE ALÍVIO



UNICAMP
Centro de Comput

0,6339 0,6460 0,6581 0,6701 0,6822 0,6943 0,7063 0,7184 0,7305 0,7425 0,7546

VELOCIDADE DO AR M/SEG.)

CHART 39



UNICAMP
Centro de Computação

FIGURA 49: DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA
T = 129,6 SEG., DEVIDO AO EFEITO DE PISTÃO MAIS VENTILA
ÇÃO FORÇADA

* SEM POÇO DE ALÍVIO
+ COM POÇO DE ALÍVIO



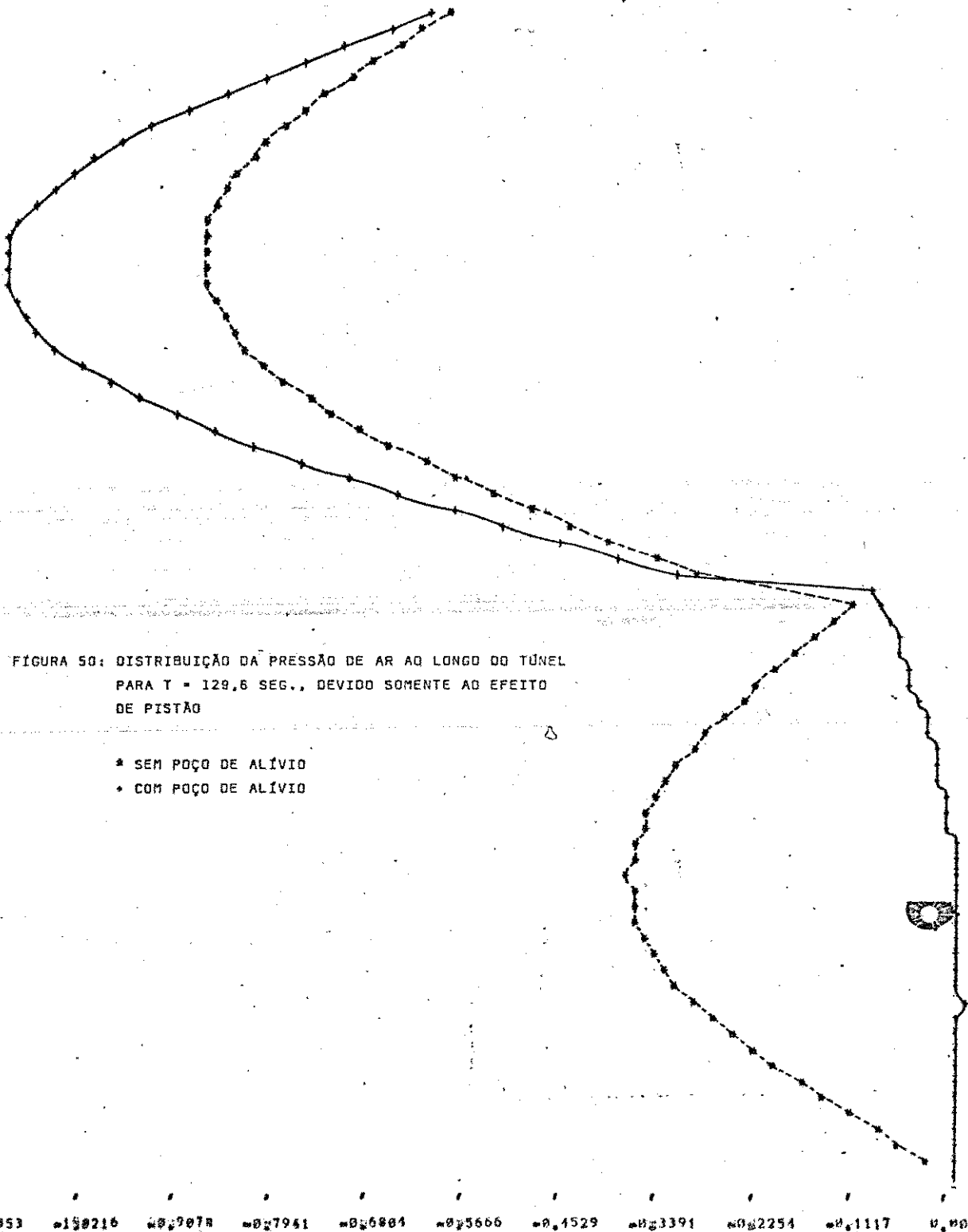
UNICAMP
Centro de Computação

-351567 -295129 -168711 -192293 -895876 0,0542 0,6968 1,3378 1,9796 2,6214 3,2632
VELOCIDADE DO AR (M/SEG.)

CHART 48



UNICAMP
Centro de Comput.

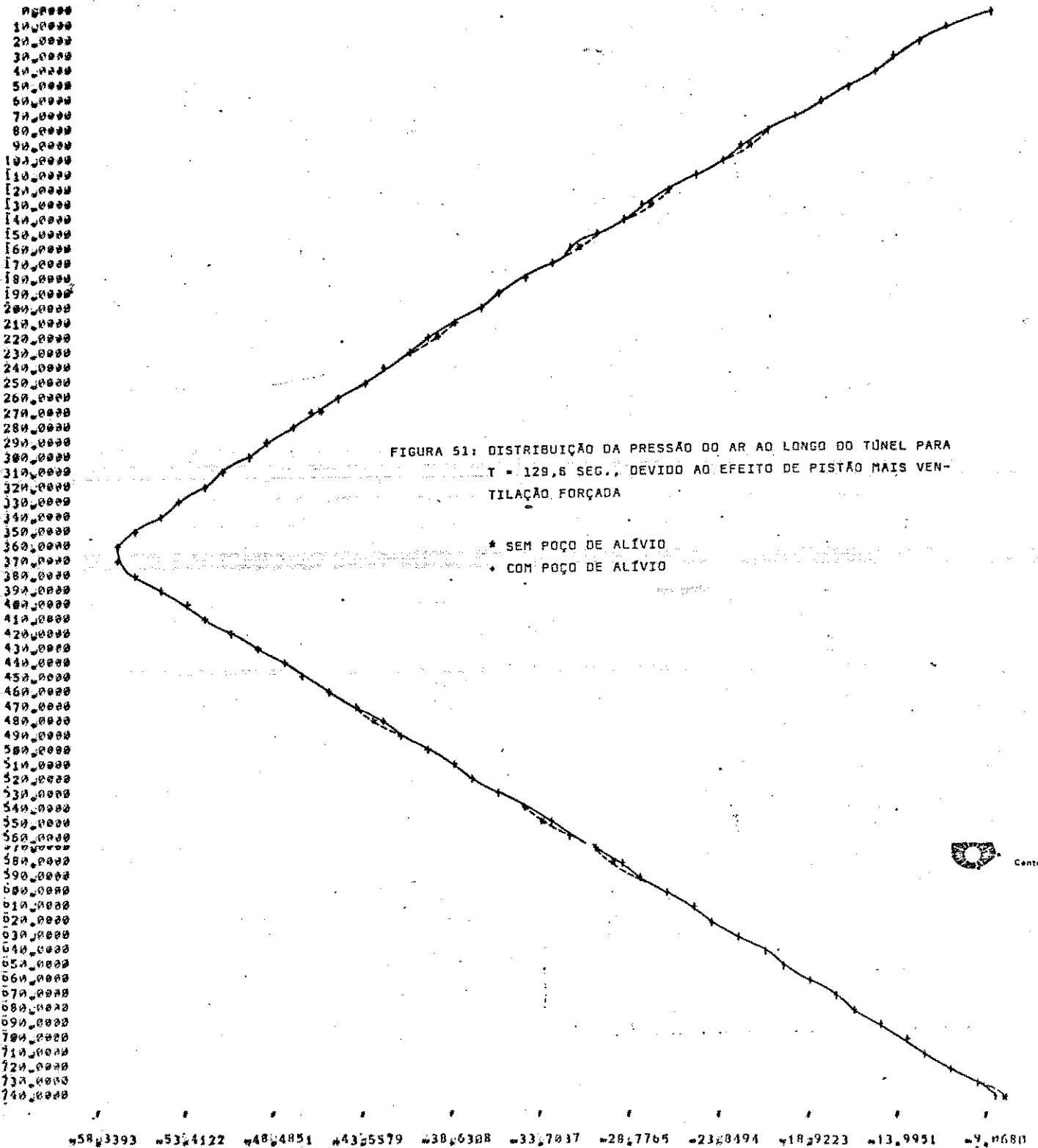


PRESSÃO DO AR (N/M²)

CHART 48



UNICAMP
Centro de Comput



UNICAMP
Centro de Comput

CHART 43



UNICAMP
Centro de Computação

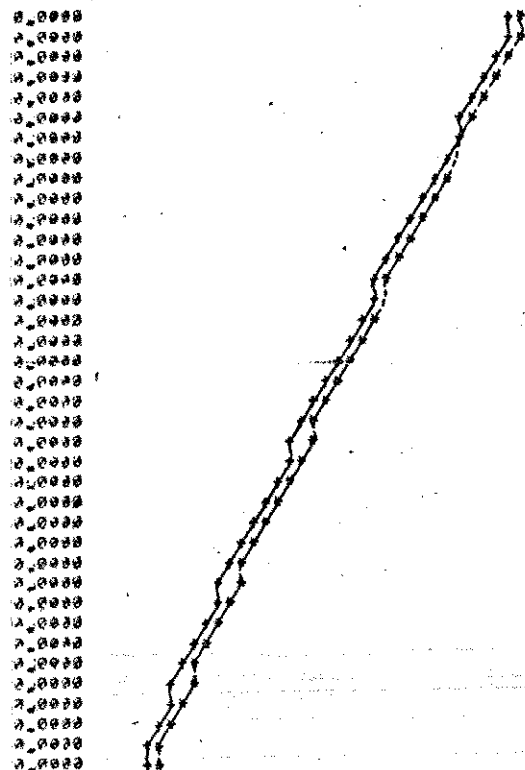


FIGURA 52: DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA
T = 172,8 SEC., DEVIDO SOMENTE AO EFEITO DE PISTÃO

- * SEM POÇO DE ALÍVIO
- + COM POÇO DE ALÍVIO



UNICAMP
Centro de Computação

0.4531 0.4608 0.4685 0.4762 0.4840 0.4917 0.4994 0.5071 0.5148 0.5225 0.5303

VELOCIDADE DO AR (M/SEG.)

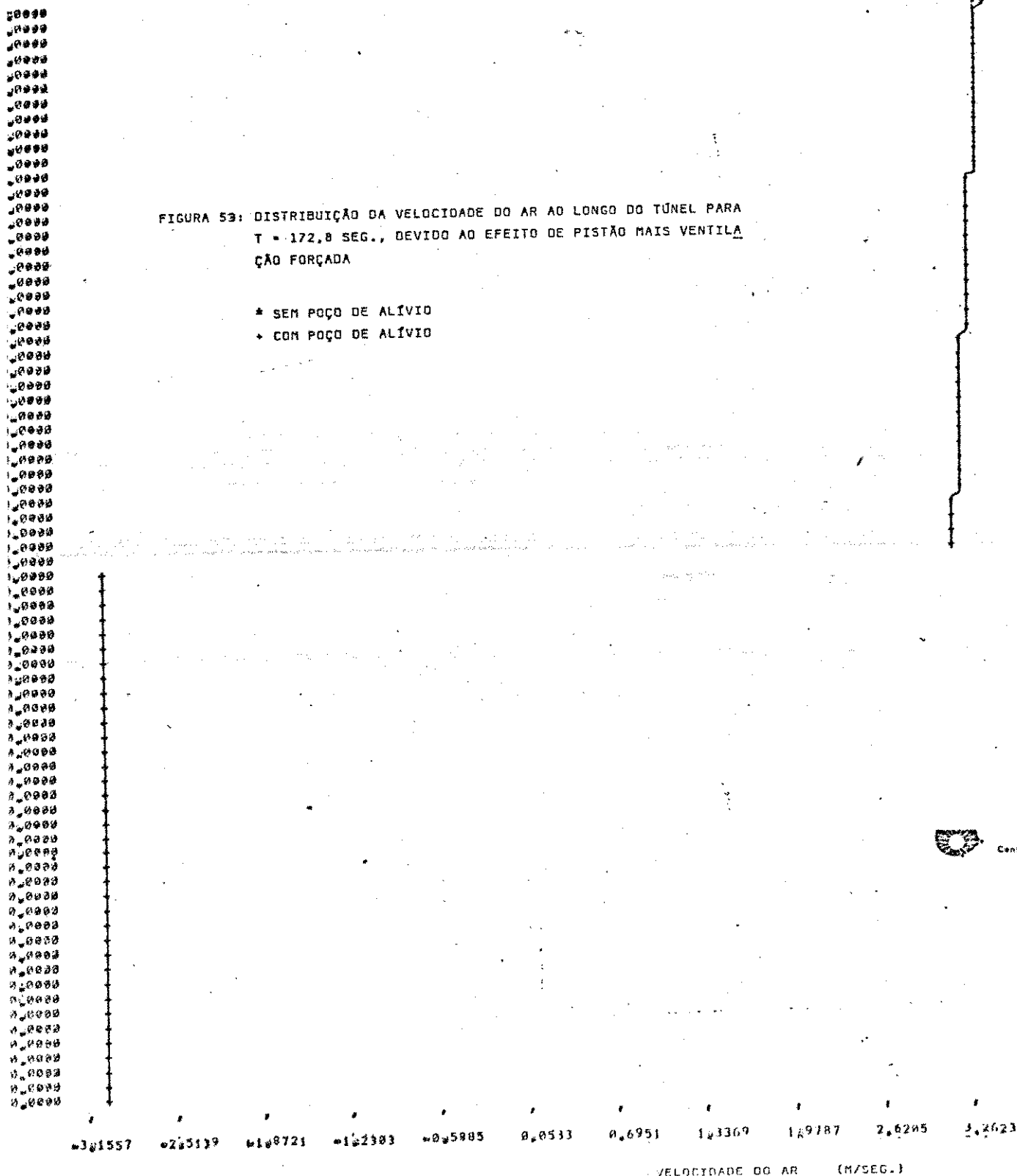
CHART 43



UNICAMP
Centro de Computação

FIGURA 53: DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA
T = 172,8 SEG., DEVIDO AO EFEITO DE PISTÃO MAIS VENTILA
ÇÃO FORÇADA

- * SEM POÇO DE ALÍVIO
+ COM POÇO DE ALÍVIO



VELOCIDADE DO AR (M/SEG.)

CHART 44

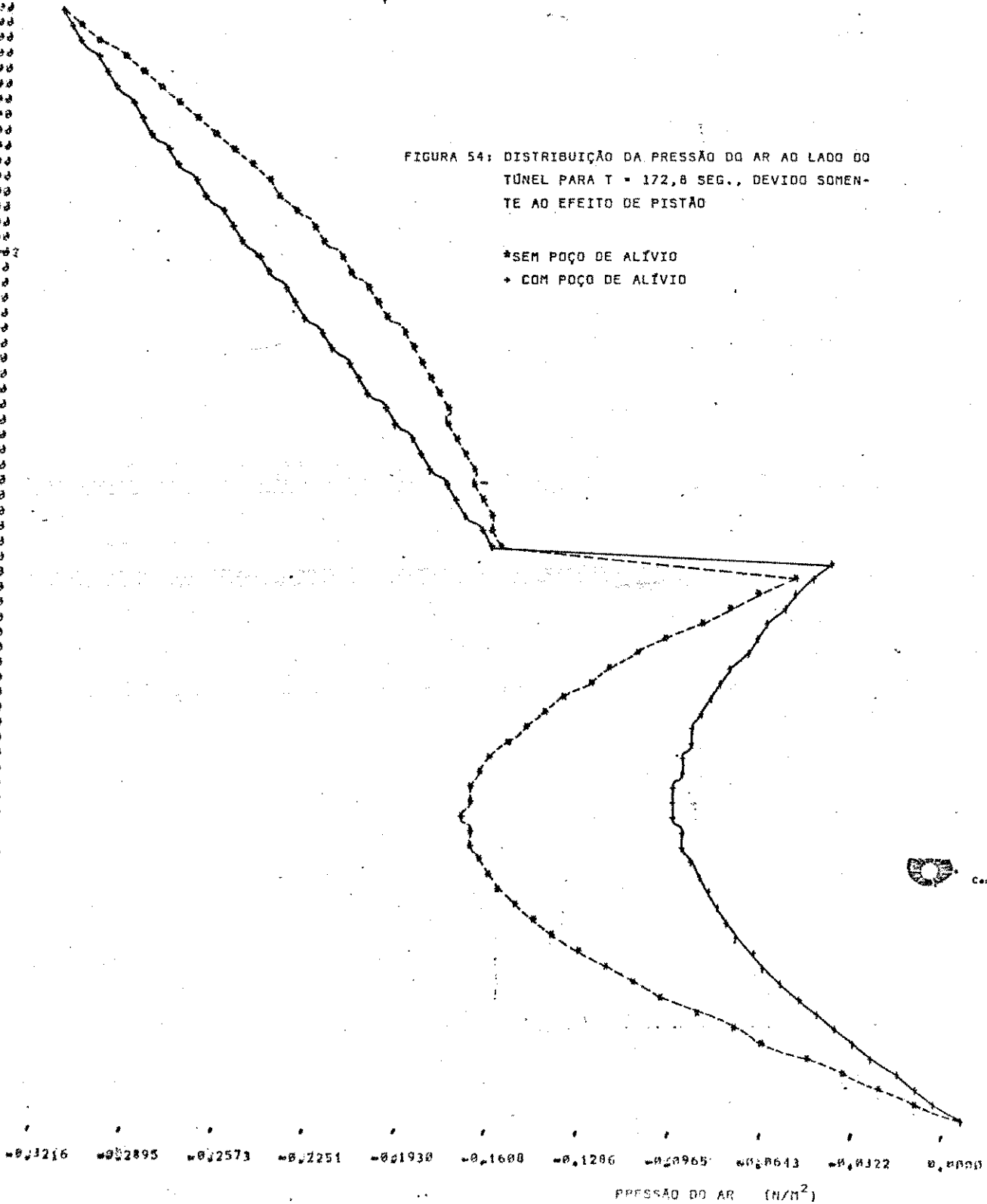


UNICAMP
Centro de Computação

0.0000
1.0000
2.0000
3.0000
4.0000
5.0000
6.0000
7.0000
8.0000
9.0000
10.0000
11.0000
12.0000
13.0000
14.0000
15.0000
16.0000
17.0000
18.0000
19.0000
20.0000
21.0000
22.0000
23.0000
24.0000
25.0000
26.0000
27.0000
28.0000
29.0000
30.0000
31.0000
32.0000
33.0000
34.0000
35.0000
36.0000
37.0000
38.0000
39.0000
40.0000
41.0000
42.0000
43.0000
44.0000
45.0000
46.0000
47.0000
48.0000
49.0000
50.0000
51.0000
52.0000
53.0000
54.0000
55.0000
56.0000
57.0000
58.0000
59.0000
60.0000
61.0000
62.0000
63.0000
64.0000
65.0000
66.0000
67.0000
68.0000
69.0000
70.0000
71.0000
72.0000
73.0000
74.0000
75.0000
76.0000
77.0000
78.0000
79.0000
80.0000
81.0000
82.0000
83.0000
84.0000
85.0000
86.0000
87.0000
88.0000
89.0000
90.0000
91.0000
92.0000
93.0000
94.0000
95.0000
96.0000
97.0000
98.0000
99.0000
100.0000

FIGURA 54: DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO DO AR AO LADO DO TÚNEL PARA $T = 172,8$ SEG., DEVIDO SOMENTE AO EFEITO DE PISTÃO

*SEM POÇO DE ALÍVIO
+ COM POÇO DE ALÍVIO



UNICAMP
Centro de Computação

CHART 44



UNICAMP
Centro de Computaç

FIGURA 55: DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO DO AR AO LONGO DO TÚNEL PARA $T = 172,8$ SEG., DEVIDO AO EFEITO DE PISTÃO MAIS VENTILAÇÃO FORÇADA

* SEM POÇO DE ALÍVIO
+ COM POÇO DE ALÍVIO



UNICAMP
Centro de Computaç

58,1390 53,4124 48,4857 43,5598 38,6324 33,7057 28,7791 23,8524 18,9257 13,9991 9,0724
PRESSÃO DO AR (N/M²)

APÊNDICE

Variação de y e z com β e L_v/D_v (extraído da ref. [6])

Razão de bloqueio do tubo Razão comprimento-diâmetro do veículo Coeficientes semi-empíricos relacionados com as perdas devido à contração do fluxo de ar através do veículo

β	L_v/D_v	y	z
0,30	10,0	3,161	-0,250
0,30	14,0	3,173	-0,357
0,30	18,0	3,628	-0,340
0,30	22,0	4,528	-0,236
0,30	26,0	5,859	-0,115
0,30	30,0	7,640	-0,010
0,35	10,0	2,065	-0,018
0,35	14,0	2,083	0,009
0,35	18,0	2,372	-0,013
0,35	22,0	2,803	-0,067
0,35	26,0	3,493	-0,125
0,35	30,0	4,415	-0,178
0,40	10,0	1,455	0,242
0,40	14,0	1,515	0,329
0,40	18,0	1,704	0,278
0,40	22,0	2,027	0,135
0,40	26,0	2,469	-0,043
0,40	30,0	3,026	-0,213
0,45	10,0	1,062	0,506
0,45	14,0	1,174	0,554
0,45	18,0	1,367	0,469
0,45	22,0	1,644	0,300
0,45	26,0	1,995	0,103
0,45	30,0	2,423	-0,092

0,50	10,0	0,765	0,788
0,50	14,0	0,916	0,718
0,50	18,0	1,126	0,582
0,50	22,0	1,396	0,421
0,50	26,0	1,722	0,262
0,50	30,0	2,101	0,119
0,55	10,0	0,499	1,183
0,55	14,0	0,673	0,893
0,55	18,0	0,891	0,685
0,55	22,0	1,156	0,537
0,55	26,0	1,470	0,434
0,55	30,0	1,829	0,361
0,60	10,0	0,243	2,002
0,60	14,0	0,384	1,460
0,60	18,0	0,580	1,108
0,60	22,0	0,828	0,988
0,60	26,0	1,129	0,753
0,60	30,0	1,484	0,664