

Nôvo Processo Para a Determinação do Diâmetro Mais Econômico Para Adutora de Recalque

ENIO GONÇALVES TELES *
Eng.º Civil e Sanitarista

1. INTRODUÇÃO

É bastante conhecida a fórmula de Bresse para cálculo do diâmetro econômico de adutora de recalque:

$$D = K \sqrt[3]{Q}$$

sendo D — o diâmetro, dado em m
Q — a vazão, dada em m³/s

e

$$K = \sqrt[6]{\frac{64 b_1 w}{15 \pi^2 \rho}} \sqrt[8]{\frac{p_1}{p_2}}$$

onde

b₁ — coeficiente da fórmula de Darcy

w — peso específico do líquido, em kg/m³

ρ — rendimento do conjunto elevatório

p₁ — preço médio por unidade de potência instalada, incluindo unidade de reserva, conservação e custeio capitalizado

p₂ — preço médio por unidade de comprimento de um conduto de diâmetro unitário, assentado.

Nêste nosso trabalho procuramos deduzir um processo simples em que pudesse ser levada em conta, para cada caso particular, a recuperação do capital investido (o número de anos e a taxa de juros para esta recuperação), as despesas com a operação, o rendimento do conjunto elevatório e a vazão aduzida.

A utilização de uma tabela e um ábaco simplifica enormemente os cálculos.

Por outro lado, os custos unitários utilizados são facilmente calculáveis.

2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

a) Nosso estudo foi feito para tubos de ferro fundido. Para o coeficiente C, na fórmula de Hazen-Williams, adotou-se o valor 100.

b) O preço de tubos de ferro fundido é proporcional ao peso do tubo (ver quadro I). Pode-se supor que a mão de obra também o seja.

$$C = K_1 p \tag{I}$$

c) É possível relacionar-se o peso com o diâmetro do tubo, por uma equação cuja forma é:

$$p = aD^3 + bD^2 + cD \tag{II}$$

(*) Engenheiro Civil diplomado pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, em 1963, curso pós-graduação de engenharia sanitária pelo Centro de Engenharia Sanitária da E.E.U.F.M.G., ex-chefe da Seção de Águas e Esgotos e da Divisão de Estudos e Projetos da Companhia Mineira de Águas e Esgotos — COMAG; diretor da TENAP, Engenharia e Planejamento, firma especializada em engenharia sanitária, com sede em Belo Horizonte.

sendo:

p — o peso por metro de tubo, dado em kg

D — o diâmetro, dado em m

a, b, c — constantes

Os valores a, b e c são, para as diversas classes de tubos:

	Classe LA	Classe A	Classe B
a	42	208,3	125
b	362	312,5	387,5
c	161	184,2	192,5

O emprêgo da equação II fornece resultados bastante satisfatórios (ver quadro II).

d) Para um caso qualquer, variando-se o diâmetro da adutora, a potência necessária para o recalque também variará, devido à diferença de perda de carga.

Mas esta variação da potência pouca influência tem, normalmente, sobre o investimento total necessário para a casa de bombas, já que o custo de grande parte das instalações (construção civil, instalações elétricas, instalações hidráulicas, instalações mecânicas) seria praticamente o mesmo.

e) A despesa com energia elétrica é diretamente proporcional à potência necessária para o recalque.

$$O = K_2 P \quad (III)$$

3. DEDUÇÃO

Uma das maneiras de se fazer comparação de custos para várias soluções é o chamado método de despesa anual.

$$\text{Despesa anual} = T = C \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + O \quad (IV)$$

sendo:

C — o investimento global, em Cr\$

r — a taxa anual de juros

n — o número de anos

O — o custo anual com a operação em Cr\$

No caso de uma adutora, o investimento será:

$$C = L K_1 p \quad (V)$$

sendo:

L — o comprimento da adutora em m

K₁ — o preço por kg de tubo assentado, em Cr\$

p — o peso por metro de tubo, em kg

A despesa de energia elétrica será:

$$O = K_2 P \quad (III)$$

sendo:

P — a potência consumida, em HP

K₂ — o custo da energia elétrica consumida por 1 HP em 1 ano (K₂ = 0,736 x número de horas de funcionamento anual x custo do kw hora).

Mas

$$P = \frac{w \times Q}{75 \times \rho} (H_g + h_f) \quad (VI)$$

sendo:

Q — a vazão, dada em m³/s

ρ — o rendimento do conjunto elevatório

Hg — a altura geométrica de recalque, dada em m

hf — a perda de carga total, dada em m

w — o peso específico do líquido, 1.000 kg/m³ (para água)

Da equação de Hazen-Williams tira-se, desprezando-se as perdas de carga localizadas:

$$hf = 0,0021 L \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}} \quad (\text{VII})$$

A equação (IV) pode, assim ser escrita:

$$T = LK_1 (aD^3 + bD^2 + cD) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + K_2 \frac{1.000 Q}{75\rho} \times \\ \times (Hg + 0,0021 L \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}})$$

Para se obter condições de máximo e de mínimo, tomar-se-á a derivada em relação a D igualada a zero.

$$\frac{dt}{dD} = 0 = K_1 \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} (3aD^2 + 2bD + c) - 0,14 \frac{K_2 Q^{1,85}}{\rho \times D^{5,87}}$$

Fazendo-se

$$K_1 \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} = \alpha \quad (\text{VIII})$$

$$0,14 K_2 \frac{Q^{1,85}}{\rho} = \gamma \quad (\text{IX})$$

A equação toma a forma

$$D^{5,87} (3aD^2 + 2bD + c) = \frac{\gamma}{\alpha} \quad (\text{X})$$

que fornece o valor do diâmetro mínimo, já que a derivada segunda é positiva

As tabelas da equação X, para os valores comerciais de D (quadro III), permitem, calculados os valores de α e γ pelas equações VIII e IX, determinar, para cada caso particular, o diâmetro mais econômico para a adutora.

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Deseja-se construir uma adutora de recalque de ferro fundido, classe LA, para a vazão de 50 l/s. Qual o diâmetro mais econômico?

a) Supondo-se que o capital deva ser recuperado em 15 anos a juros de 24% ao ano, tem-se:

$$\alpha = K_1 \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} = 550 \times 0,24991 \\ \alpha = 137,5$$

$$\gamma = 0,14 K_2 \frac{Q^{1,85}}{\rho}$$

$K_2 = 300.000$ (Cr\$), para funcionamento de 24 horas por dia (tarifa CEMIG).
 $\rho = 0,7$ (arbitrado)

$$\gamma = 0,14 \times 300.000 \frac{1,95 \times 10^{-4}}{0,7} \\ \gamma = 11,7$$

Então:

$$\frac{\gamma}{\alpha} = 0,0851$$

A tabela III fornece, para o valor mais próximo:

$$D = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Velocidade} = v = 1 \text{ m/s}$$

b) Considerando-se que a recuperação do capital investido deve ser feita no período de vida útil da adutora (suposto igual a 70 anos) e a juros de 6% ao ano, tem-se:

$$\alpha = 550 \times 0,06103 = 33,6$$

$$\gamma = 11,7$$

$$\frac{\gamma}{\alpha} = 0,348$$

Valôr este situado, na tabela III, entre os correspondentes aos diâmetros 300 e 350 mm e bastante próximo do primeiro.

$$D = 300 \text{ mm}$$

$$\text{Velocidade} = v = 0,72 \text{ m/s}$$

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

a) O exemplo dado mostra que o número de anos fixados para a recuperação do capital e a taxa de juros anual influem, de fato, na determinação do diâmetro mais econômico.

b) Se houver necessidade de se considerar, também, o investimento com a estação elevatória, pode-se desdobrar o coeficiente K_2 em duas parcelas:

$$K_2 = K'_2 + K''_2 \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

sendo:

K'_2 — o custo da energia elétrica consumida por 1 HP em um ano.

K''_2 — o custo da estação elevatória por HP instalado, em Cr\$

c) Para outros valores do coeficiente C, da fórmula de Hazen-Williams, basta multiplicar γ pela relação $\left(\frac{C}{100}\right)^{1,85}$

d) O valôr de ρ pode ser obtido, com grande aproximação, conhecendo-se a vazão e a potência necessárias.

e) O valor de $\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$ é encontrado em tabelas, para diversos valores de n e r.

f) O valor de $Q^{2,85}$ pode ser determinado com auxílio do ábaco apresentado no quadro IV.

g) O quadro I mostra que:

— o preço por pêso independe da classe do tubo, o mesmo não acontece com o preço por diâmetro.

— a variação máxima observada na relação **preço-pêso** é menor que 12%, para os diâmetros de 50 a 600 mm, e, praticamente, nula a partir de 100 mm.

— a relação **preço-diâmetro** aumenta de, aproximadamente, 100% de 100 mm para 600 mm.

h) Para cobrir as despesas com a mão-de-obra na adutora pode-se acrescentar, no preço dos tubos, uma porcentagem que varia segundo o custo da mão-de-obra local. Geralmente de 5% a 25%.

i) Para um mesmo caso, as despesas com pessoal de manutenção e operação, independem do diâmetro adotado. Por isso não foram consideradas na dedução da fórmula, pois dariam derivadas nulas.

j) Para outros líquidos, o processo pode ser utilizado multiplicando-se γ por $\frac{w}{1000}$,

sendo w o pêso específico do líquido a ser aduzido.

QUADRO I

TUBOS DE FERRO FUNDIDO — PREÇOS POR METRO E POR QUILOGRAMA
(ferroflex pixados — Dezembro 1966)

D _{mm}	CLASSE LA				CLASSE A				CLASSE B			
	P _{kg/m}	Preço por metro Cr\$	Preço ÷ diam.	Preço ÷ peso	P _{kg/m}	Preço por metro Cr\$	Preço ÷ diam.	Preço ÷ peso	P _{kg/m}	Preço por metro Cr\$	Preço ÷ diam.	Preço ÷ peso
50	10	5.155	103,1	515,5	11	5.690	113,8	517,3	12	6.215	124,3	517,9
60	12	6.240	104,0	520,0	13	6.720	112,0	516,9	14	7.255	120,9	518,2
75	15	8.295	110,6	553,0	16	8.780	117,1	548,7	17	9.320	124,3	548,2
100	20	9.890	98,9	494,5	22	10.975	109,8	498,9	23	11.465	114,7	498,5
125	26	12.875	103,0	495,2	28	13.975	111,8	499,1	30	14.965	119,7	498,8
150	32	15.850	105,7	495,3	35	17.460	116,4	498,9	38	18.955	126,4	498,8
250	47	23.225	116,1	494,1	51	25.450	127,3	499,0	55	27.445	137,2	499,0
300	63	31.165	124,6	494,7	63	34.430	137,7	499,0	75	37.430	149,7	499,1
350	82	40.565	135,2	494,7	89	44.430	148,1	499,2	96	47.915	159,7	499,1
400	103	50.950	145,5	494,7	111	55.405	158,3	499,1	121	60.385	172,5	499,0
200	125	61.830	154,6	494,6	137	68.385	171,0	499,2	147	73.365	183,4	499,1
450	149	74.390	165,3	499,3	163	81.370	180,8	499,2	177	88.355	196,3	499,2
500	176	87.875	175,8	499,3	192	95.845	191,7	499,2	208	103.820	207,6	499,1
550	204	101.850	185,2	499,3	223	111.310	202,4	499,1	242	120.805	219,6	499,2
600	235	117.340	195,6	499,3	256	127.790	213,0	499,2	278	138.765	231,3	499,2

QUADRO II

COMPARAÇÃO ENTRE OS PÊSOS FORNECIDOS PELA FÓRMULA II E OS REAIS, PARA TUBOS DE FERRO FUNDIDO

$$p = aD^3 + bD^2 + cD$$

pêso em kg

D (mm)	CLASSE LA		CLASSE A		CLASSE B	
	p (Calc.)	p (real)	p (calc.)	p (real)	p (calc.)	p (real)
50	9,0	10	10,0	11	10,6	12
60	11,0	12	12,2	13	13,0	14
75	14,1	15	15,6	16	16,7	17
100	19,6	20	21,5	22	23,3	23
125	25,9	26	28,3	28	30,3	30
150	32,0	32	35,3	35	38,0	38
200	46,7	47	51,0	51	55,0	55
250	63,1	63	68,9	69	74,3	75
300	81,5	82	89,0	89	96,0	96
350	101,9	103	111,7	111	120,2	121
400	124,3	125	137,0	137	147,0	147
450	148,7	149	165,3	163	176,5	177
500	175,4	176	196,3	192	208,7	208
550	205,0	204	230,5	223	243,9	242
600	234,7	235	268,0	256	282,0	278

PÊSO REAL DADO PELO CATÁLOGO DA BARBARÁ, PARA TUBOS FERROFLEX

	Classe LA	Classe A	Classe B
a	42	208,3	125
b	362	312,5	387,5
c	161	184,2	192,5

QUADRO III
TABELA DA EQUAÇÃO

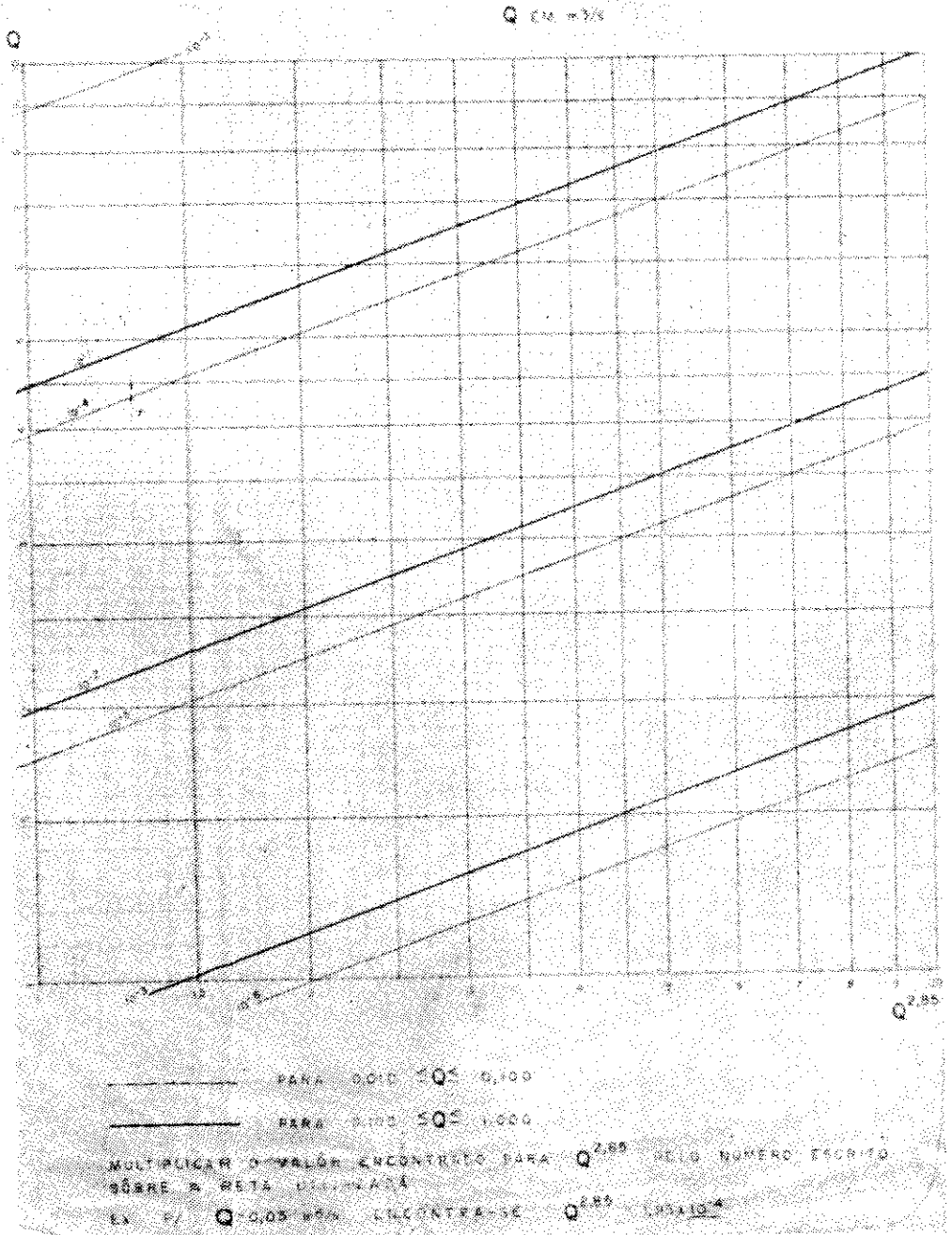
$$D^{5,87} (3aD^2 + 2bD + c) = \frac{\gamma}{\alpha}$$

D (m)	VALOR DE γ/α		
	Classe LA	Classe A	Classe B
0,050	0,0000046	0,0000050	0,0000054
0,060	0,000014	0,000015	0,000016
0,075	0,000054	0,000058	0,000063
0,100	0,00032	0,00034	0,00037
0,125	0,00127	0,00136	0,00148
0,150	0,00397	0,00426	0,00462
0,175	0,0105	0,0113	0,0122
0,200	0,0245	0,0264	0,0286
0,250	0,102	0,111	0,120
0,300	0,332	0,365	0,391
0,350	0,906	1,012	1,074
0,400	2,17	2,46	2,60
0,450	4,72	5,45	5,69
0,500	9,48	11,16	11,52
0,550	17,87	21,44	21,90
0,600	31,95	39,10	39,51

	Classe LA	Classe A	Classe B
b	42	208,3	125
a	362	312,5	387,5
c	161	184,2	192,5

ÁBACO PARA DETERMINAÇÃO DE $Q^{2,85}$

QUADRO IV



Princípios de Aerotécnica

PARTE V (quinta parte)

ENG. J. CARVALHO LOPES

Professor Catedrático da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais e da Escola de Minas de Ouro Preto.

TRANSFORMAÇÃO DA ENERGIA

(Princípio de BERNOULLI)

Demonstração empregando TUNEL DE VENTO e tubo de seção variável. Visualização manométrica pelo álcool colorido.

O estudo que apresentamos nesta quinta parte consta do aproveitamento de relatório de "trabalho de laboratório" dum aluno, o de n.º 574 da terceira série de eng. mecânicos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Belo Horizonte. Empregou-se uma das três bôcas do Tunel de Vento da referida Escola, descrito no capítulo primeiro desta série. Potência de 20 HP e descarga de 20 am., com tubo quadrado (seção) de ar de $V_\infty = 17,8$ m/s, pois o tubo Prandtl indicou 20 mm de álcool, donde

$$V = 4\sqrt{h_e} = 4\sqrt{20} = 17,8 \text{ m/s}$$

velocidade do jato, não perturbada (infinito-montante).

Pedimos que me relevem os professôres, os engenheiros e os técnicos em geral, que lerem o desenvolvimento que segue, que poderia parecer prolixo e monótono. Nossa exposição é, todavia, didática, dirigida a alunos de Mecânica dos Flúidos de nossas escolas de engenharia, cujos conceitos sôbre Física nos chegam tão deturpados. É que nós professôres recebemos, do secundário, algo fraco nêsses assuntos. Ainda há pouco, em concurso de admissão à Escola de Arquitetura, alunos entraram com Bária, Newton e outras do sistema Giorgio; embrenhavam-se na confusão entre pêso e massa, terminando errando no cálculo de pressão em simples coluna d'água. Nossa Cadeira, com sete disciplinas, tem cêrca de 500 alunos. Somos forçados, por questão de horário, a organizar 25 turmas de 20 alunos, o que é excessivo em trabalhos de laboratório. Chamada morosa, inevitável alguma algazarra, chegadas tardias perturbadoras, etc., de modo que se pode contar no máximo com 25% de alunos eficientes.

O ar, com 17,8 m/s penetra no citado tubo de seção variada ao longo de seu eixo, as velocidades se modificando e conseqüentemente as pressões, conservando constante a soma das energias correspondentes. O tubo da fig. 1 apresenta onze (11) tomadas estáticas (com incidência normal e sem saliência interna), dez das quais vão ter ao tôpo das colunas do "multi-manômetro", transmitindo-lhes as respectivas pressões, com exceção do extremo da direita que está aberta para a atmosfera, e chamado "testemunha" (tomada 0 = zero). Define êste as características do jato não perturbado. Sua pressão é a da sala do laboratório, isto é, a atmosférica local, que vimos ser de 66,5 cm de Mercúrio ou 9000 milímetros de coluna d'água, ou 9000 kg/m², ou 9000 metros de coluna de ar no laboratório, uma vez que o ar aí é mil vêzes menos pesado que a água (1,022, ou sensivelmente 1 kg/m³). Sendo o jato livre na atmosfera, pela terceira Regra de Bresse numa seção reta do mesmo

ESQUEMA DO TUBO DE VENTURI

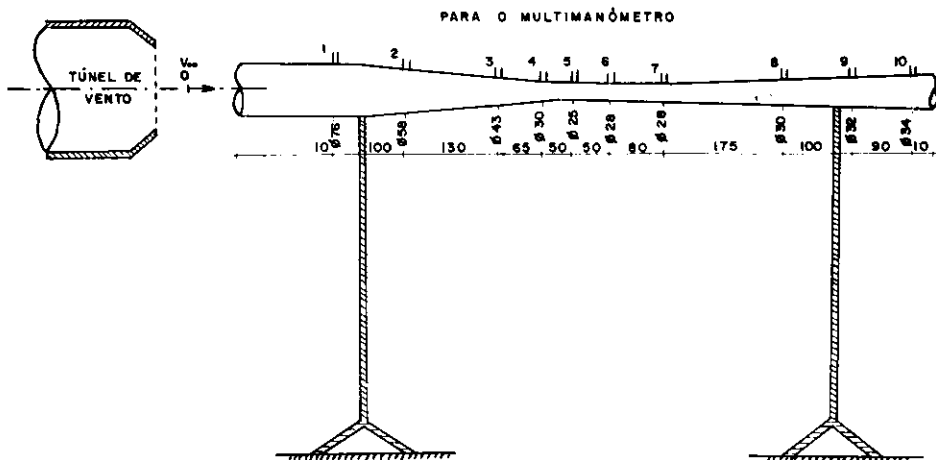


FIG. 1

FIG. 1

reinará a pressão atmosférica. Na realidade o tubo Pitot-Prandtl acusa pressão ligeiramente inferior, de fração de mm. A velocidade não perturbada, como vimos, é,

$$V_{\infty} = 17,8 \text{ m/seg}$$

Estes dois elementos, de índice infinito, abstração feita das cotas, definem a altura do plano absoluto de carga:

$$p_{\infty}/\omega + V^2_{\infty}/2g = H$$

ou

$$9000/1 + 17,8^2/2 \cdot 9,80 = 9000 + 16,33 = 9016,33 \text{ metros}$$

que é a cota do plano de carga absoluto: H em metros de ar, segundo nossa convenção. Para partículas já penetradas no tubo e, pois, **perturbadas**, a equação de Bernoulli se escreverá (sem índices):

$$p/\omega + V^2/2g = H = 9016,33 \text{ metros,}$$

p e V ao longo duma trajetória “média” e referentes ao quilograma de fluido transportado. Cabem aqui duas observações importantes:

1 — Dizem os compêndios que a espessura “média” atmosférica (envoltório gasoso da Terra) é da ordem de 80 a 100 quilômetros. **Como, então, poderíamos agora achar que a “altura atmosférica”, H, pouco ultrapassa 9 Km?** — Este resultado, que sempre intriga os alunos, decorre justamente de considerarmos o ar incompressível e de densidade constante. Volveremos detalhadamente, justificando-o, a este procedimento no fim do presente capítulo. Nas fórmulas supra o ar é suposto incompressível e de densidade referente ao ambiente do laboratório (1022 kg/m³). A realidade, porém, não é esta. Vimos, no capítulo III, que a pressão atmosférica decresce, e conseqüentemente a densidade, numa razão logarítmica expressa por

$$Z = Z_0 + K \cdot \log \cdot p_0/p \quad \text{para } K = (18,4 + 0,067 \cdot t_m)$$

e nesta correlação pressão-cota é que tem apóio o chamado “nivelamento barométrico”, pois Z₀ é a cota do laboratório e Z cota numa altitude genérica. Como se conhecem Z₀

e p_0 , medindo p ter-se-á Z , isto entre dois pontos da superfície terrestre; t_m é a temp. média decorrida nos dois pontos. Se, como suposto, a densidade do ar fosse constante como o é a da água (fluidos homogêneos), a depressão variaria "linearmente" com a cota, como na Hidrostática (diagrama das pressões, que vimos no curso). Como, realmente, o ar nas altitudes se vai tornando cada vez mais leve, em vista da compressibilidade (expansão do gás, suposta isotérmica a transformação), nas baixas faixas de altitude (O a A na fig. 2) a variação é mais rápida que na linha MB das altitudes mais elevadas. Até um ponto M a variação é mais rápida que a linear. Acima, na parte MB da curva, a variação é mais lenta que a linear tornando-se quase imperceptível além dos 30 Km, em que a pressão não passa de um milibar.

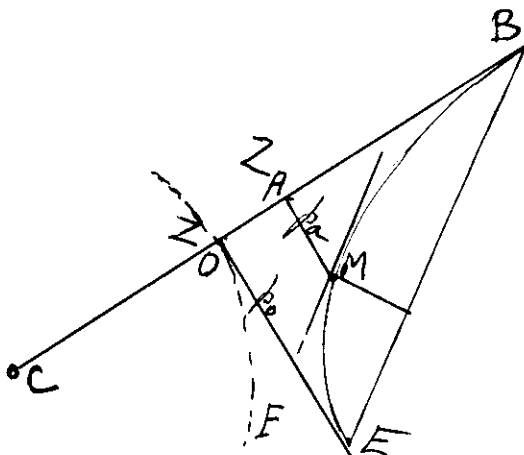


FIG. 2

Em outras palavras, se comprimirmos estes 80 Km para os nossos 9, teríamos nossa pressão básica invariável. Na fig. 2, acima, C é o centro da Terra, CB é a vertical do local Z_0 . Z_0 -F é o nível médio dos mares, Z_0 -E é a pressão normal (1000^o mb), Z_A é a cota de A, Z_A -M é p_a e finalmente EMB é a "curva das pressões. A pressão decresceria de E até B, linearmente segundo a reta. EB - ou segundo a curva EMB, cujo trecho inferior EM apresenta gradiente maior que o linear e o superior MB menor.

2 — A segunda observação consiste em que nos diagramas usuais da Hidráulica (perfis de troncos distribuidores de água, etc.), as alturas das pressões variam positivamente segundo Z . Como no caso da atmosfera terrestre o contrário se verifica, as pressões decrescendo com o aumento das cotas, na montagem aerotécnica a "linha piezométrica", definida pelos topos das colunas de álcool colorido (encarnado) do multimanômetro, FICA INVERTIDA, isto é, as compressões comprimem as colunas para baixo e as depressões "chupando" o álcool para cima da "linha de carga efetiva" que é a horizontal definida pelo tubo piezométrico "testemunho" já descrito. A fig. 3, de colunas em escala natural (um milímetro verticalmente no papel é o desnivelamento de um milímetro em coluna de álcool) ilustra o que afirmamos. Zero é o tubo piezométrico testemunha, que dita a pressão atmosférica. Os tubos 1-2 e 3 estão com colunas comprimidas, definindo pressões. Os de 4 a 10, com topos de colunas acima, o estão sob depressão. A fig. 4, com escala indicada, é a ampliação do fenômeno. O exame deste gráfico mostra, de modo concreto, como as três formas de energia da equação de Bernoulli se transformam, se intercambiam, CONSERVANDO CONSTANTE A SOMA. A curva piezométrica separa as áreas: de pressão abaixo e das velocidades acima. Este desenho, que pela sua clareza dispensa explicações, é a síntese do quadro I, cujas 12 colunas têm a significação que vai abaixo:

COLUNA I — É a seqüência das seções de 1 a 10. Zero corresponde ao tubo manométrico zero do multimanômetro, exposto à pressão atmosférica (fig. 3) e de mesma cota do vaso de álcool alimentador que se vê ao lado. Define o "plano de carga efetivo", horizontal, que comanda as pressões efetivas.

COLUNA 2 — Dá as pressões em “milímetro de coluna de álcool”. Em acôrdo com nossa convenção o símbolo é h_e (e = étílico) e como se refere a pressão teremos h_{ep} . Decorre das leituras diretas no multimanômetro e o cuidado na sua apreciação é a base do trabalho que estamos apresentando.

COLUNA 3 — Indica as alturas álcoolícas “convertidas em milímetros de água”, decorrendo da multiplicação por 0,8 (pêso espec. do álcool relativo à água) dos elementos da coluna (2).

TRANSFORMAÇÃO — CONSERVAÇÃO DA ENERGIA BERNOULLI

ESQUEMA DO MULTIMANÔMETRO = COM ONZE TUBOS

Conexões para o tubo experimental

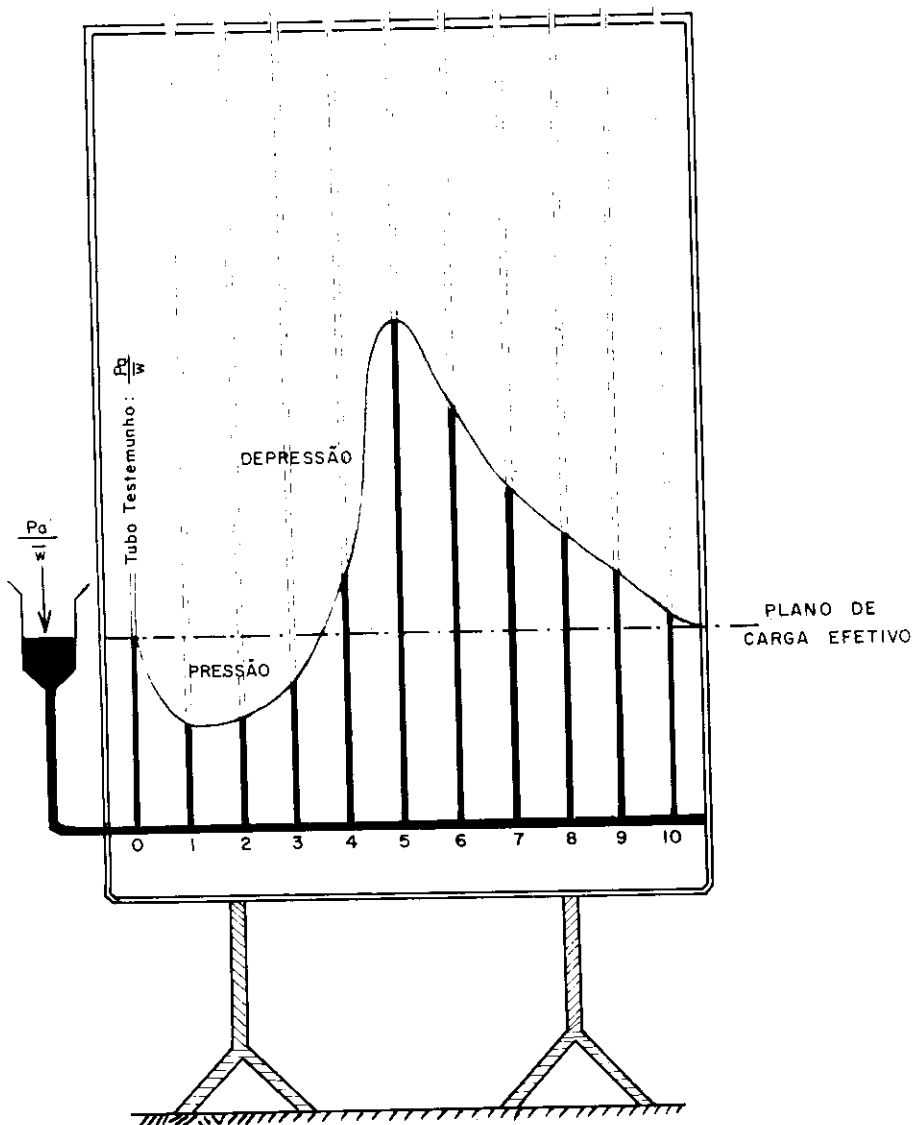
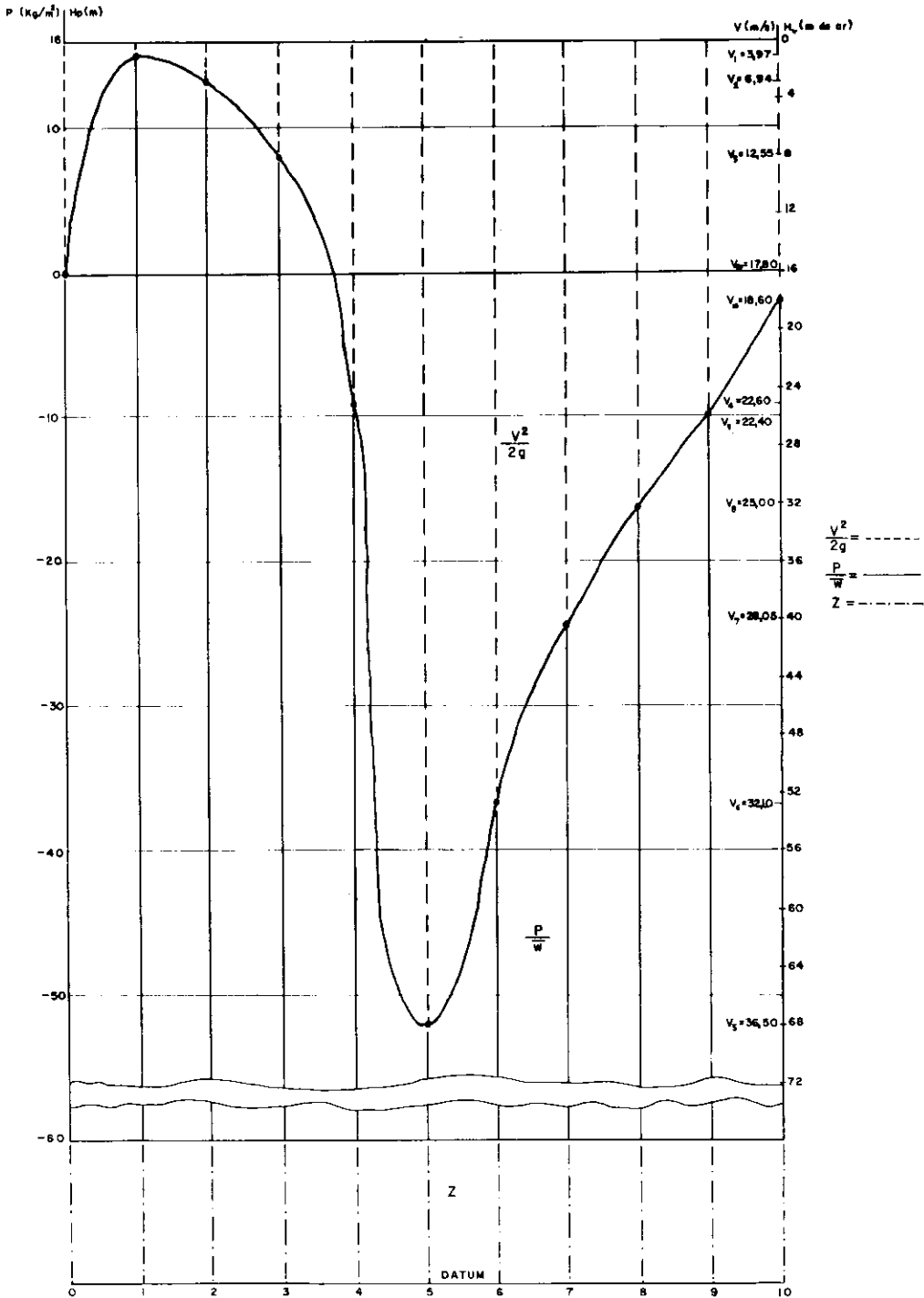


FIG. 3

São, pois, "milímetros de água" (h_{ap} e como o milímetro de água cobrindo um metro quadrado perfaz um litro de água "que pesa um Kg", a coluna exprime também Kg por metro quadrado, que vai repetido na coluna (6) como veremos.

TRANSFORMAÇÃO — CONSERVAÇÃO DA ENERGIA BERNOULLI

T. L. - 3
E. E. U. F. M. G.



$$Z_{\infty} + \frac{P_{\infty}}{W} + \frac{V_{\infty}^2}{2g} = Z + [9000 + 16] (mm) = H = \text{PLANO CARGA ABSOLUTO}$$

FIG. 4

COLUNA 4 — Indica as alturas de água correspondentes às velocidades. Poderia ser obtida com o “tubo de Prandtl”, porém preferimos subtrair da cota de energia a cota da pressão. Como desprezamos as perdas de energia (admitindo Perfeito o fluido).

QUADRO I

1	2	3	4	5	6		8	9	10	11	12	Obs.					
					Pressões								diâmetro	área	vazão	Velocidade	
					h _{ap}	h _{av}										Absoluta	Efet.
Seção	Milímetros			metro	Kilogr./m. quad		cm	dm ²	litro s e g	metro/segundo							
0	0	0	16,0	16	9000,0	0	—	—	—	—	17,80	Testeumbu					
1	+19	+15,2	0,8	0,8	9015,2	+15,2	15,2	1,820	72,6	3,99	3,97						
2	+17	+13,6	2,4	2,4	9013,6	+13,6	11,6	1,060	73,5	6,92	6,94						
3	+10	+ 8,0	8,0	8,0	9008,0	+ 8,0	8,6	0,580	72,7	12,42	12,55						
4	-12	- 9,6	25,6	25,6	8990,4	- 9,6	6,2	0,312	70,7	23,10	22,60						
5	-65	-52,0	68,0	68,0	8948,0	-52,0	5,0	0,196	71,5	36,70	36,50						
6	-46	-36,8	52,8	52,8	8963,2	-36,8	5,4	0,229	73,6	31,60	32,10						
7	-30	-24,0	40,0	40,0	8976,0	-24,0	5,6	0,246	70,8	28,60	28,05						
8	-20	-16,0	32,0	32,0	8984,0	-16,0	6,0	0,283	70,8	25,90	27,00						
9	-12	- 9,6	25,6	25,6	8990,4	- 9,6	6,7	0,322	72,0	22,50	22,40						
10	- 2	- 1,6	17,6	17,6	8998,4	- 1,6	7,0	0,386	71,8	18,70	18,60						

o plano de energia “efetivo” é a horizontal de cota $H - p_{\infty}/\omega$ que será forçosamente $= V^2_{\infty}/2g = 20 \text{ mm de álcool} = 20 \cdot 0,8 = 16 \text{ mm de água}$.

O segmento “velocidade” seria, para cada seção, a soma algébrica:

$$h_{av} = 16 - (\pm h_{ap}) (*)$$

cujo segundo termo será uma subtração se h_{ap} for positivo (compressão) e soma se h_{ap} negativo (depressão).

Assim se formou a coluna 4, que o Prandtl poderia confirmar, porém essas medidas são difíceis, pois requerem um micro-Prandtl especial, introdutível no interior do tubo de experiência. Assim teremos os V indiretamente, por duas vias.

COLUNA 5 — Representa colunas verticais de ar EM METROS, decorrendo do pêso esp. do ar em altitudes próximas de 800 m (Belo Horizonte, S. Paulo) estar próximo da unidade (1 Kg/m³). Conseqüentemente, “milímetro d’água corresponde a metro de ar”

COLUNA 6 — Dá para os 10 pontos, a pressão absoluta EM QUILOGRAMOS POR METRO QUADRADO. Resulta evidentemente da “soma algébrica” de 9000 e as pressões efetivas, seja:

$$Pr \cdot abs \cdot = 9000 + (\pm pr \cdot efet)$$

COLUNA 7 — Das pressões efetivas, também em Kg/m² ou mm d’água, nada mais sendo que a repetição dos números da coluna (3).

COLUNA 8 — Diâmetro das seções, em centímetros.

COLUNA 9 — Áreas das seções em decímetros quadrados.

(*) Esta equação vem da do pé da fig. 4, que se refere a pressões absolutas, o plano definido pelo tubo zero sendo o Plano Piezométrico absoluto. Feita abstração das cotas (z) e elevando o plano

de comparação de $\frac{p_{\infty}}{\omega}$ teremos: $0 + \frac{V^2_{\infty}}{2g} = H - 9000 = 9016 - 9000 = 16$ donde $\frac{p_i}{\omega} + \frac{V^2_i}{2g} = 16$ (m. de ar ou mm. d’água), ou, como se faz no laboratório: $\pm h_{api} + h_{v_i} = 16,16$ que é a equação acima.

COLUNA 10 — Vazão, constante, de 18 litros/seg., traduzindo o regime permanente variado, ou estacionário variado.

COLUNAS 11 e 12 — Ambas definem as velocidades, obtidas por duas vias: pelo quociente Q/S , isto é: vazão dividida pela área da seção na coluna 11 e por $\sqrt{2gH}$ na coluna 12, H sendo a "altura", em metro, do fluido escoante, o ar.

Todos os cálculos foram feitos com régua logarítmica de 25 centímetros, não havendo necessidade de meios com maior aproximação em face da precisão das leituras manométricas (efeitos de paralaxe, refração, meniscos capilares, etc.), e da natural oscilação, embora pequena, das colunas, que refletem a de qualquer escoamento.

Interpretando o tema que nos propomos neste 5.º capítulo diremos que as colunas 7 e 12 do quadro-síntese MOSTRAM EXUBERANTEMENTE O QUANTO PRESSÕES E VELOCIDADES OSCILAM COMPENSANDO-SE. Adotado um "datum", como no desenho 4, tem-se as três formas de energia (Bernoulli) cujas alturas, somadas, alcançam o "plano de energia". As ordenadas, constantes, dos ZZ, definem a trajetória horizontal do eixo de escoamento. Em nosso caso do ar, se os ZZ fossem variados e não numa horizontal, em nada se alterariam os estudos supra. Isto se comprova no laboratório (Túnel de Vento) inclinando-se o tubo do ensaio (tendo o cuidado de se manterem os eixos do tubo e jato coincidentes). A própria montagem vertical do tubo de experiência, fácil de obter-se, em nada alteraria as conclusões estudadas. Já não sucede o mesmo em se tratando da água, cujo $p. l.$ sendo cerca de mil vezes maior, as diferenças de cotas necessitam de se levarem em conta. Além do mais, a montagem sendo horizontal (Eixo do tubo), mesmo **sob escoamento hídrico** o resultado seria o mesmo.

NOS ESCOAMENTOS INFRASSÔNICOS O AR É CONSIDERADO "INCOMPRESSÍVEL"

Como vimos, em nossos estudos aerotécnicos do presente capítulo consideramos o ar incompressível, de densidade constante e despojado de viscosidade. Implica isto, evidentemente, em desvios da realidade dos fenômenos, porém este afastamento é tolerável, como veremos. As oscilações percentuais da densidade são pequenas, tanto quanto as das já pequenas pressões efetivas em jôgo.

O efeito pressão decorrente do movimento é ρV^2 , sendo ρ a massa específica e V a máxima velocidade considerada e as concordâncias são tanto mais satisfatórias quanto este efeito é desprezível em face da pressão imperturbada (p_∞). Nosso quadro I mostra que a pressão atmosférica do ambiente do laboratório no decorrer dos trabalhos oscilou em torno de 9000 Kg/m² (ponto ou seção zero) agindo no piezometro-testemunho do multimanômetro. A máxima velocidade observada de 36,5 m/s ou 131 400 Km/hora, ocorreu na seção 5 e mesmo que fosse de 40 m/s o efeito seria:

$$\rho V^2 = \frac{\omega}{g} \cdot V^2 = \frac{1}{9,8} \cdot 40^2 = 162,8 \text{ Kg/m}^2$$

O erro seria, então, da ordem de

$$\frac{162,8}{9000} = 0,0181$$

inferior a 2%, portanto.

A máxima pressão observada, depressão ocorrente na mesma seção 5, é de - 52 Kg/m² (negativa, coluna 7), que causa desvio de

$$\frac{52}{9000} = 0,00578$$

sob erro pouco acima de meio por cento (0,5%).

De modo geral escreve-se que a condição imposta, condição limite, é que as velocidades sejam uma fração de

$$\sqrt{\frac{p_0}{\rho}}$$

visto que $a = 1,2 \sqrt{\frac{p_0}{\rho}} = 1,2 \sqrt{gH_0}$ é próximo do MACH

H_0 , sendo a altura atmosférica "em metros" de ar (pr · barom · local), CONSIDERADA CONSTANTE A DENSIDADE DO AR. Em nosso caso, $H_0 = 9\ 000$ metros, pois milímetro de água é metro de ar, em Belo Horizonte e São Paulo. A velocidade do som seria, portanto:

$$0,4 \sqrt{90\ 000} = 120 \text{ metros/seg}$$

Boa prática tem sido o estabelecer o limite inferior da faixa intrassônica em $a/3$ seja:

$$0,4 \sqrt{9\ 000} = 120 \text{ metros/seg}$$

ou 120 m/s (cento e vinte metros/seg), que acarretaria para a velocidade do ar:

$$432 \text{ Km/hora,}$$

bem acima da média de cruzeiro dos DC-3.

O quadro I mostra, pois, à saciedade, que estamos muito abaixo desta fronteira. De 432 a 1 296, Kms/hora a faixa se denomina INFRASSÔNICA e acima desta chamada "barreira do som" a gama é dita SUPERSÔNICA, coisa muito em moda atualmente. A série de aviões supersônicos norte-americanos X_n ($n = 1, 2, 3, \dots$) vem alcançando 5 e mais

Machs. Quanto aos foguetes, nem se fala. O recente americano SV-5D, é lançado, a mais de 150 Km de altitude, do nariz de potente foguete, e manejado por impulsos como uma espaçonave comum, penetra a atmosfera e, por seu sistema de "flaps" e retro-foguetes aterrissa com perfeição em determinado aeroporto, podendo ser re-usado, além de dispensar o deslocamento de cerca de dez mil homens e seu oneroso aparelhamento para re-captura de aeronaves pelo método convencional.

Esfôrço conjugado anglo-francês, que já produziu o famoso Caravelle, lançará em breve grande avião de passageiros, o Concorde, cujo protótipo fez sensação há pouco na 27.^a Exposição Aeronáutica de Paris em Le Bourget. Fará seu primeiro vôo a 28-2-1968 e seu preço comercial poderá atingir 21 milhões de dólares. Antecipará seu competidor: Boeing SST que saltará o Atlântico (2 900 Km/h) em 2 h 20 min, em 55 min. menos que o Concorde com 2 350 Km/h.

Fica, assim, justificado, nosso proceder no manejo da equação de Bernoulli. No limite sônico (turbilhão em hélices aéreas) e acima do mesmo (jato, foguete, projetís, etc.), os erros se vão gradualmente tornando intoleráveis ao se admitirem a incompressibilidade e constância de densidade do ar. As fórmulas se complicam e a análise matemática, pelo menos no estado em que atualmente se acha, mostra-se impotente na solução dos casos extremados como os super-jatos norte-americanos da série X, o último alcançando cerca de 5 Machs. Eis o motivo por que se estabelecem os onerosíssimos "túneis de vento" supersônicos e de grandes dimensões para que o grau de semelhança praticamente alcance o tamanho natural ($\lambda = 1$). Quarenta mil HP acionam o da Westinghouse e temos notícia de um francês em que se usam três turbinas de 40 mil HP. Nesta competição as nações se impõem sacrifícios de grandes portes.

Finalmente diremos que longe estão nossos p_∞ e $\bar{\omega}$ de se manterem firmes.

São condições locais médias. Na rotina aeronáutica se estabeleceu, para efeito comparativo a chamada "atmosfera padrão" internacional (1919-Toussaint):

$$\bar{\omega} = 1,226 \text{ Kg/m}^3 \quad \rho = 0,125 \text{ Kg} \cdot \text{seg}^2/\text{m}^4 \quad p_\infty = 10\ 332 \text{ Kg/m}^2 \quad \text{com } t_c^0 = 15^\circ$$

Finalmente, a fig. 5 é a mesma fig. 4, porém agora com as velocidades e pressões expressas, respectivamente, em metros por segundo e quilogramas por metro quadrado, ao invés das alturas representativas.

Com a desvantagem de não se somarem (quantidades heterogêneas), dão, todavia, uma visão magnífica do andamento INVERSO das suas variações. Quando a pressão sobe, a velocidade decresce e inversamente.

FIG. 5

TRANSFORMAÇÃO - CONSERVAÇÃO DA ENERGIA - BERNOULLI

