

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 Prêto.

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

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

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

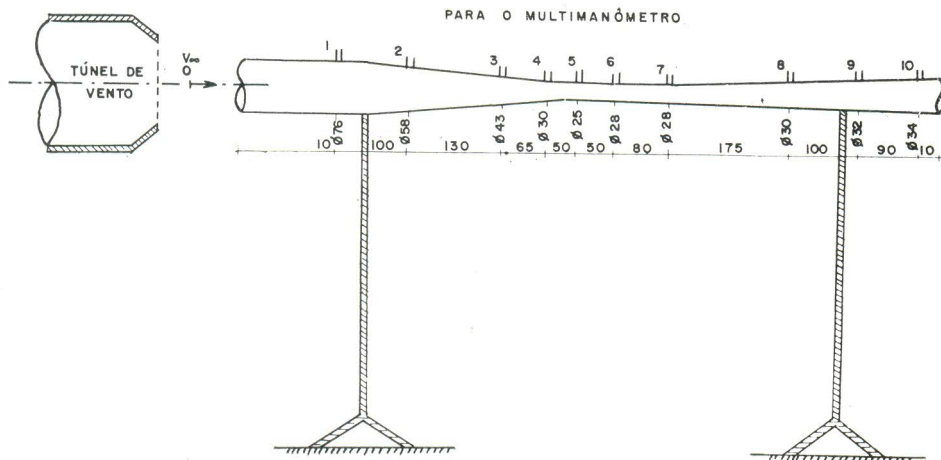


FIG. 1

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:

$$p_{\infty}/\bar{\omega} + V_{\infty}^2/2g = H$$

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):

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

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.

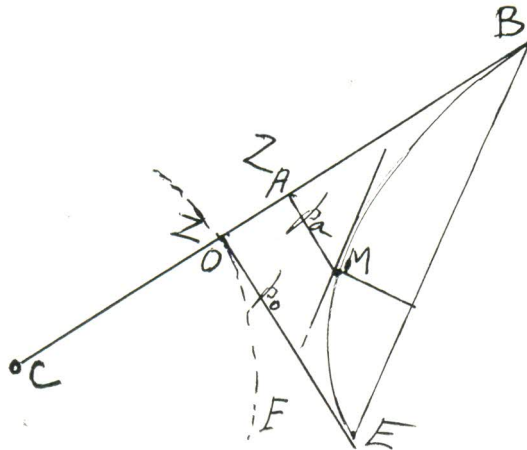


FIG. 2

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 (perfís 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 dêste 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. Êste desenho, que pela sua clareza dispensa explicações, é a síntese do quadro I, cujas 12 colunas têm a significação que vai abaixo:

COLUNA 1 — 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 = etílico) 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 álcoolicas “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

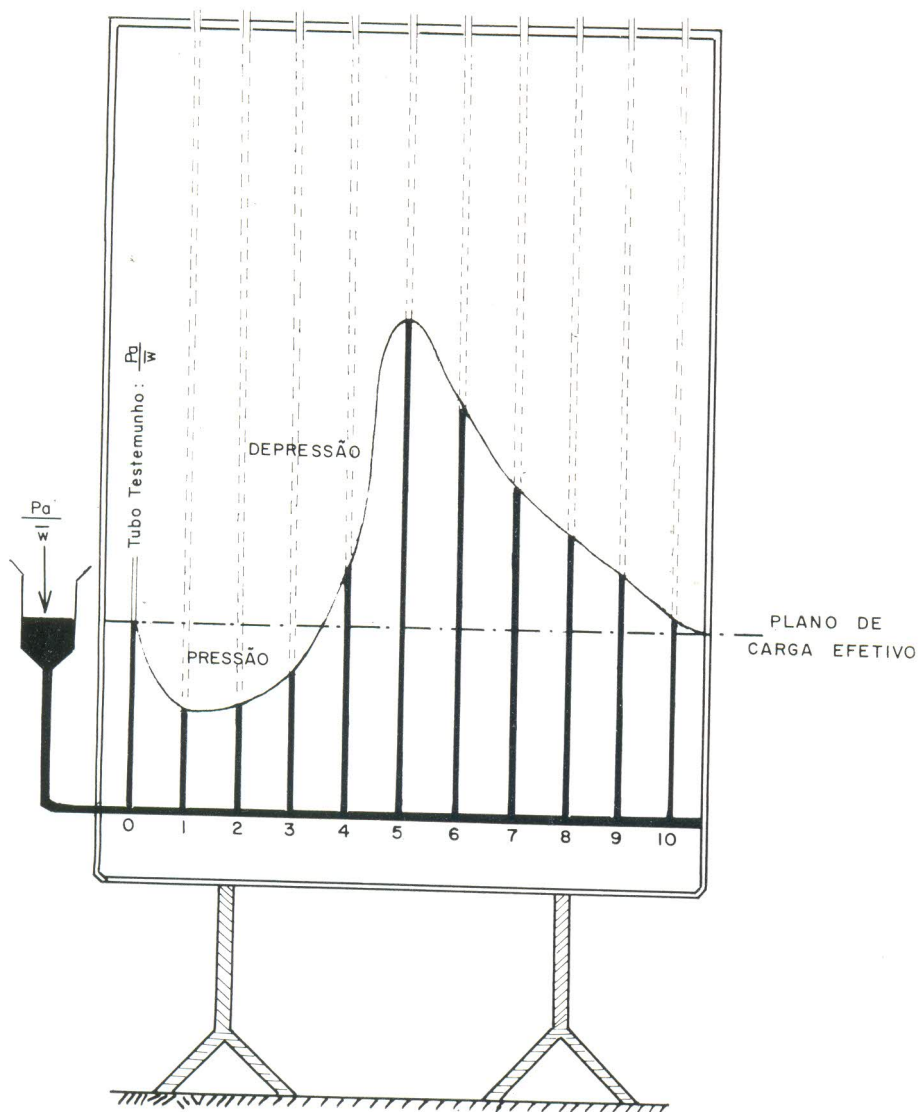
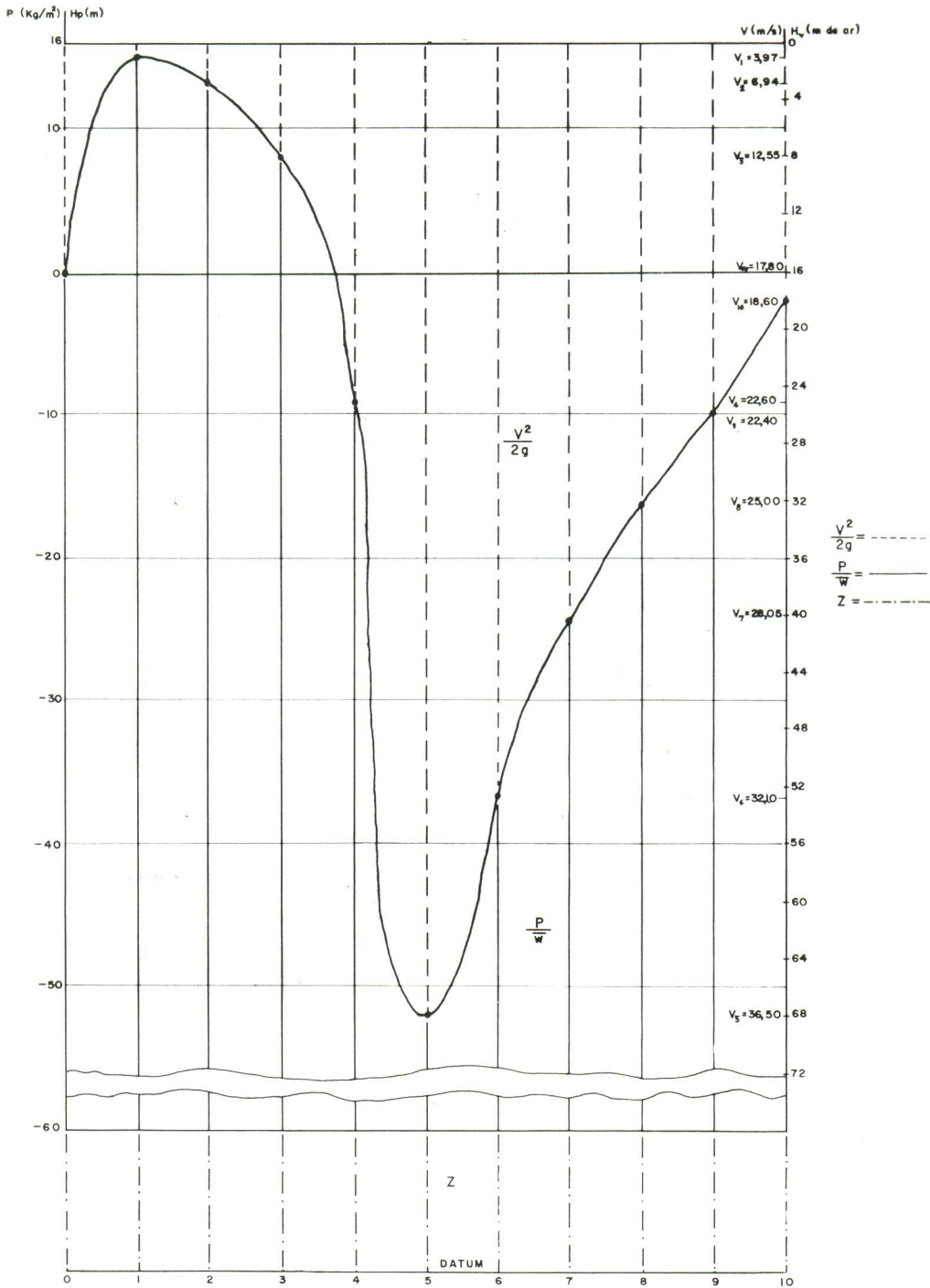


FIG. 3

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

Seção	col. álcool pressão		col. água pressão		col. água veloc.		col. ar veloc.		Pressão		diâmetro	Área	veloc.	Velocidade		Obs.	
	h_{ap}	h_{sp}	h_{ap}	h_{sp}	h_{av}	H	Absoluta	Efet.	D	S				Q	Q/S		$\sqrt{2gH}$
	Milímetros				metro	metro	Kilogr./m. quad	cm	dm ²	litro seg				metro/segundo			
0	0	0	0	0	16,0	16	9000,0	0	—	—	—	—	—	—	17,80 _{es}	Testemunho	
1	+19	+15,2	0,8	0,8	0,8	9015,2	+15,2	15,2	1,820	72,6	3,99	3,97	Entrada				
2	+17	+13,6	2,4	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	8,0	9008,0	+ 8,0	8,6	0,580	72,7	12,42	12,55					
4	-22	- 9,6	25,6	25,6	25,6	8990,4	- 9,6	6,2	0,312	70,7	23,10	22,60					
5	-65	-22,0	68,0	68,0	68,0	8948,0	-22,0	5,0	0,196	71,5	36,70	36,50					
6	-46	-36,8	52,8	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	40,0	8976,0	-24,0	5,6	0,246	70,8	28,60	28,05					
8	-20	-16,0	32,0	32,0	32,0	8984,0	-16,0	6,0	0,283	70,8	25,40	25,40					
9	-12	- 9,6	25,6	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	17,6	8998,4	- 1,6	7,0	0,386	71,8	18,70	18,60	Saida				

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:

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

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 péso esp. do ar em altitudes próximas de 800 m (Belo Horizonte, S. Paulo) estar próximo da unidade (1 Kg/m^3). Conseqüentemente, “**m. límetro 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/m^2 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 $z = \frac{p_{\infty}}{\omega}$ 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: $\pm h_{api} + h_{avi} = 16_{j-10}$ 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:

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

O erro seria, então, da ordem de

$$\frac{162,8}{9\ 000} = \approx 0,0181$$

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

$$\frac{52}{9\ 000} = \approx 0,00578$$

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

$$\sqrt{\frac{p_a}{\rho}}$$

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

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 ($n = 1, 2, 3 \dots i$) 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-captação de astronaves 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 ($\lambda = 1$ um). 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):

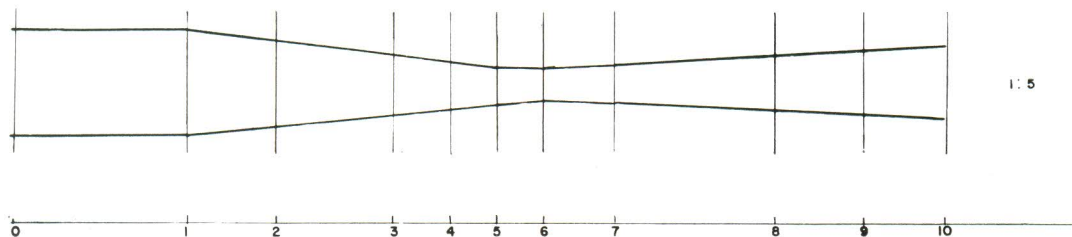
$$\bar{\omega} = 1,226 \text{ Kg/m}^3 \quad \rho = 0,125 \text{ Kg} \cdot \text{seg}^2/\text{m}^4 \text{ e } p_\infty = 10\ 332 \text{ Kg/m}^2 \text{ com } t_c^\circ = 15^\circ$$

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



1:5

