Objetivos da segunda aula **da unidade 5:**

Introduzir alguns dos principais métodos práticos de utilização do tubo de Pitot.

Propor o exercício 5.14.2 e o 5.14.3

1ª Possibilidade - Método da SABESP

Como o tubo de Pitot possibilita a determinação da velocidade real pontual, e considerando que a velocidade varia ao longo da seção transversal, é comum determinar-se a velocidade máxima do escoamento, ou seja, a velocidade no eixo do conduto e multiplicá-la por um certo ***fator***, determinando, desta forma, a velocidade média.

Este ***fator*** é obtido com o levantamento da curva de velocidade na seção considerada.

A situação mais prática é representada por um conduto forçado de seção transversal circular; neste caso a curva de velocidade é obtida posicionando-se o tubo de Pitot nos raios médios dos anéis de igual área em que seria dividida a seção transversal, como indica a figura 5.9.

$$a = 4\pi R\sqrt{\frac{2n-1}{2N}\left(1-\frac{2n-1}{2N}\right)} \quad e \quad R_n = R\sqrt{\frac{2n-1}{2N}}, \text{ onde:}$$

a = área de cada anel; R = raio da seção do tubo; n = número de ordem dos aneis a partir do centro; N = número total de anéis e R_n = raio médio dos anéis de igual área.

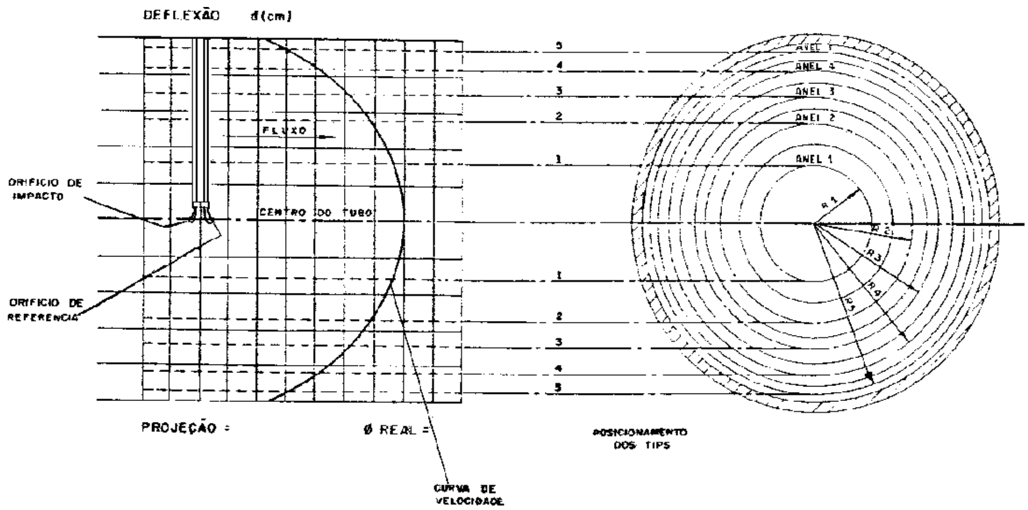


Figura 5.9

Como na prática, o posicionamento do tubo de Pitot nos raios médios dos anéis de igual área é difícil usa-se um ***gráfico especial*** previamente impresso, que apresenta 10 divisões equidistantes em que se distribuem os valores do diâmetro, e nas quais será posicionado sucessivamente o tubo de Pitot, medindo-se, em cada uma delas o desnível do fluido manométrico do manômetro diferencial. Esse desnível, assim obtido, é plotado no referido ***gráfico especial*** o qual apresenta nas linhas tracejadas, os pontos equivalentes aos raios médios dos anéis de iguais áreas.

As linhas cheias representam as ordenadas e servem para quaisquer diâmetros, pois significam: $0, \frac{D}{10}, \frac{2D}{10}, \frac{3D}{10}, \frac{4D}{10}, \ldots, \frac{9D}{10}, D$

Na abscissa, dividida em 20 partes, são lançados os desníveis do fluido manométrico, definindo-se o valor da escala, em função do desnível máximo.

O ***gráfico especial*** está representado pela figura 5.10.

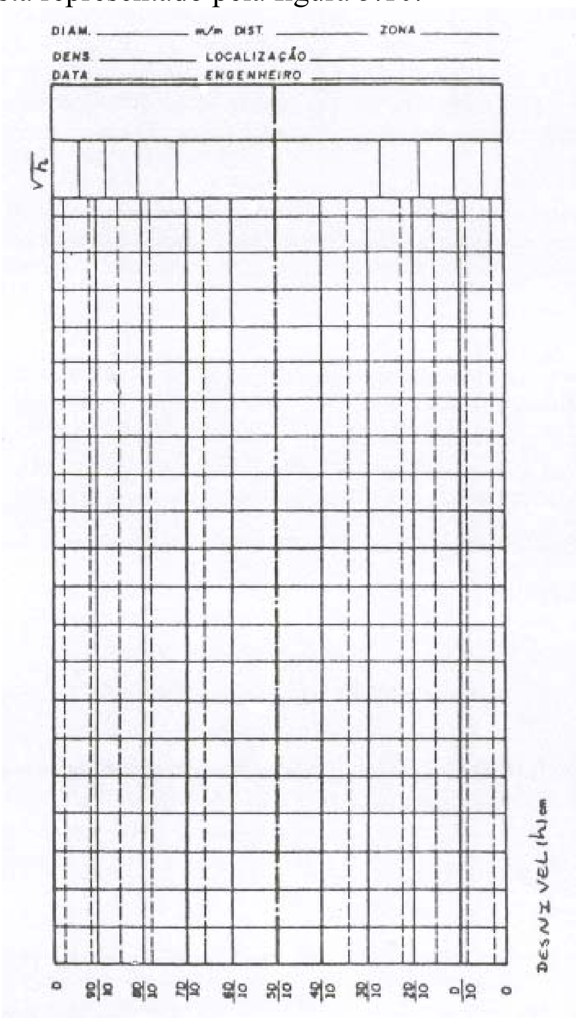


Figura 5.10

Uma vez definidos e lançados os pontos no gráfico, traça-se a curva de velocidade, que cortará a linha tracejada referente aos raios médios dos anéis de áreas iguais, fornecendo nessa intersecção os valores dos desníveis do fluido manométrico que obteríamos, se tivessemos posicionado o tubo de Pitot naqueles pontos.

Para a determinação do ***fator*** que possibilitará a determinação da velocidade média, calcula-se a média da raiz quadrada de cada um dos valores lidos na intersecção mencionada, exceto para a central e divide-se pela raiz quadrada do desnível máximo.

$$\text{fator} = \frac{\sum \sqrt{h}}{10} \frac{1}{\sqrt{h_{max}}} \qquad \text{equação 5.11}$$

É importante salientarmos que este método é aplicável para tubulações com diâmetro maior ou igual a 100 mm (4”), para diâmetros menores deve-se adotar outro método.

Para condutos retangulares um mínimo de 16 (figura 5.11) e um máximo de 64 leituras são feitas em centros de áreas retangulares iguais. Em seguida é tirada a média das velocidades.

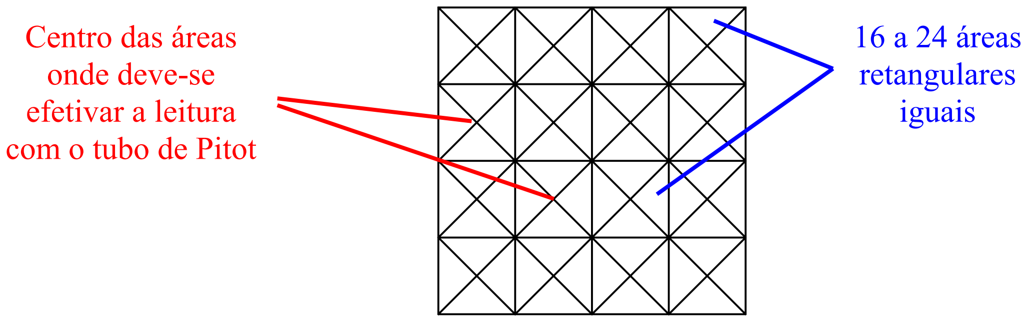


Figura 5.11

Para que esta 1ª possibilidade fique clara, passamos a apresentar um exemplo aplicado a pesquisa de vazamentos, realizado por funcionários da SABESP em 1978.

Considerando-se a origem de referência em uma das paredes, obteve-se os dados representados pela Tabela I.

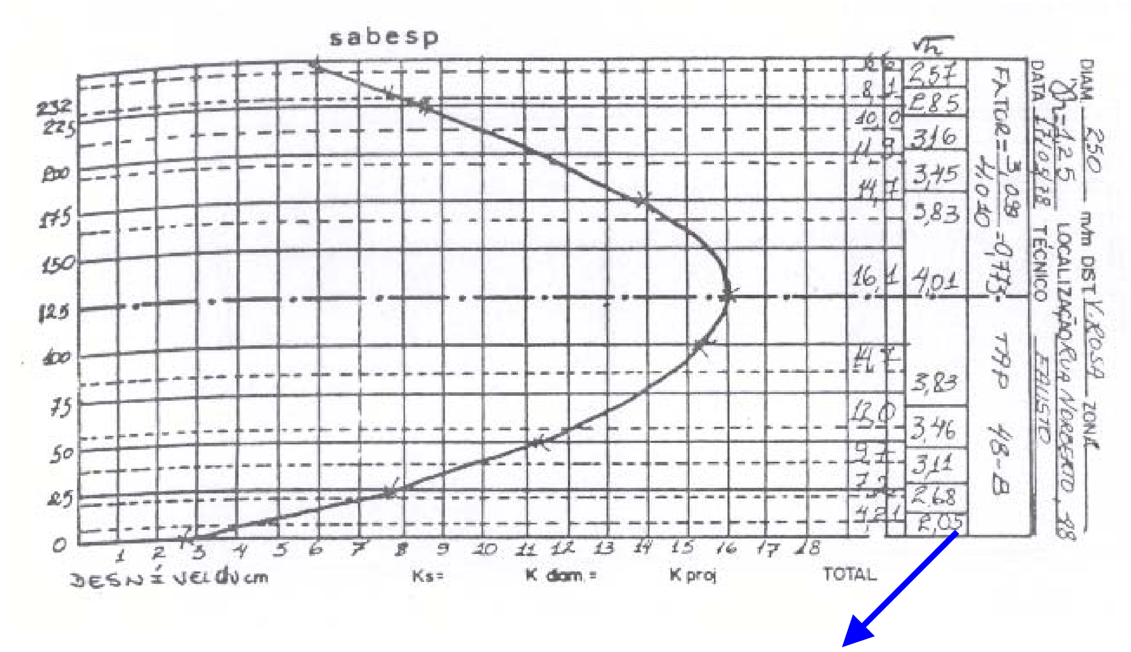
Distância do Cursor à Origem de Referência (mm)	Desnível do Fluido Manométrico (mm)
0	27
25	78
50	113
75	138
100	153
125	161
150	156
175	140
200	114
225	98
235	78
250	60

Tabela I

Através do desnível máximo estabelece-se a escala na abscissa e traça-se o diagrama de velocidade (figura 5.12).

Com o tubo de Pitot posicionado no centro da tubulação, executando-se 21 medidas do desnível de fluido manomérico, espaçadas de 30 segundos umas das outras. Os valores obtidos foram: 16,8 - 16,5 - 17,0 - 17,1 - 16,8 - 16,0 - 16,2 - 16,2 - 16,8 - 16,3 - 16,8 - 16,0 - 16,0 - 17,0 - 17,2 - 16,1 - 16,4 - 16,2 - 16,7 - 16,2 - 16,5 (cm).

A média dos 21 valores do desnível é que será usado para a determinação da velocidade média.



valores obtidos na intersecção da curva de velocidade com as linhas pontilhadas (h), que são os valores usados para a determinação do fator

Figura 5.12

Através da equação 5.11, temos:

$$v_{real} = \sqrt{2g.(\gamma_r - 1)}\ \sqrt{h}$$, que para o nosso exemplo seria:

$$v_{real} = 2{,}2\sqrt{h}$$, portanto para a velocidade máxima teríamos:

$$v_{max} = 2{,}2\sqrt{0{,}165} \quad \therefore \quad v_{max} = 0{,}900\ \textit{m/s}$$

Podemos a partir deste ponto determinar a VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO, ou seja:

$$v = \textit{fator} \times V_{máx} = 0{,}773 \cdot 0{,}900$$

$$v = 0{,}696 \text{ m/s}$$

resposta

2ª Possibilidade - Método Convencional Prático

Este método, que passamos a apresentar, não tem nenhuma restrição em relação ao diâmetro da tubulação.

Evocando-se o conceito de velocidade média, temos:

$$v = \frac{1}{A} \int V_i \, dA$$

Considerando o caso prático mais comum, ou seja, conduto forçado de seção transversal circular, temos:

$$v = \frac{1}{\pi R^2} \cdot \int V_i \cdot 2\pi \, r \, dr$$

$$v = \frac{2}{R^2} \cdot \int V_i \, .r \, . \, dr$$

Evocando-se o conceito de integração gráfica, temos:

$$v = \frac{1}{R^2} \cdot \sum_{i=1}^{n} (V_i \cdot r_i \cdot \Delta r_i) \qquad \text{equação 5.12}$$

Para exemplicarmos esta 2ª possibilidade, consideramos os dados obtidos em uma bancada de laboratório em 1974.

O tubo de Pitot foi instalado em um conduto forçado de seção transversal circular com diâmetro igual a 41,7 mm, obtendo-se os dados representados pela Tabela II, onde:

r - raio genérico com origem no eixo do conduto.

h - desnível do fluido manométrico, que no caso foi o mercúrio.

DADOS: $\gamma_{H2O} = 1000 \text{ kgf / m}^3$
$g = 9{,}81 \text{ m / s}^2$
Hg com $\gamma_r = 13{,}58$

r (m)	-1,80	-1,20	-0,60	0	0,60	1,20	1,80
h (m)	2,5	3,8	4,3	4,5	4,3	3,8	2,5

Tabela II

Ao evocarmos a equação 5.11, podemos calcular a velocidade pontual na seção considerada, como mostramos a seguir:

$$v_{REAL} = \sqrt{2 \,.\, 9{,}81 \,.\, (13{,}58 - 1)} \,.\, \sqrt{h}$$

$$v_{REAL} \approx 15{,}71 \,.\, \sqrt{h}$$

Através da expressão obtida acima, podemos calcular as velocidades (Tabela III), que possibilitam traçar o diagrama de velocidade ao longo do diâmetro da seção considerada (v = v (r)) - cujo esquema encontra-se representado pela Figura 5.13 .

r (cm)	-1,80	-1,20	-0,60	0	0,60	1,20	1,80
v (m/s)	2,48	3,06	3,26	3,33	3,26	3,06	2,48

Tabela III

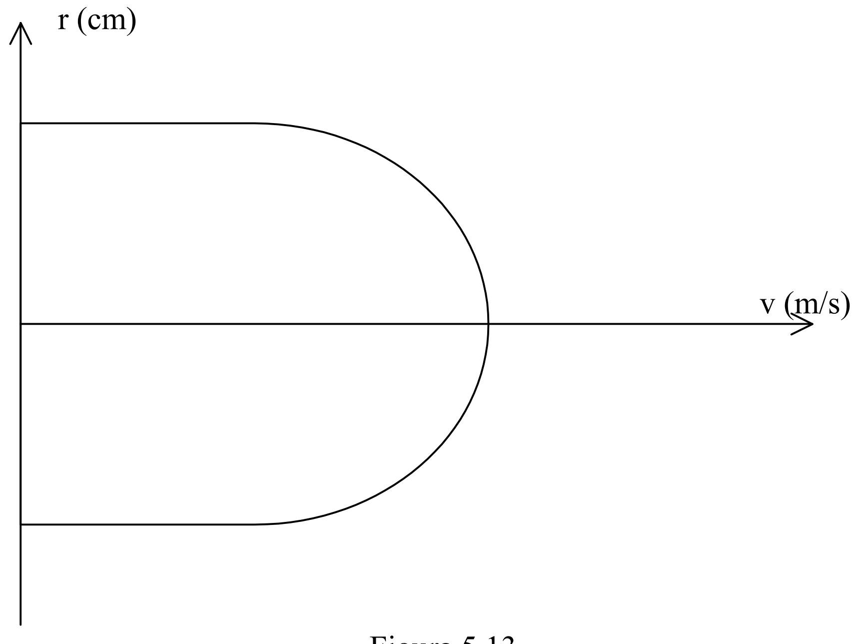


Figura 5.13

Através do diagrama representado pela figura 5.13 elaboramos a tabela IV, conveniente para obtermos o resultado da equação 5.12, ou seja:

$$v = \frac{2}{R^2} \cdot \sum_{i=1}^{n} (V_i \cdot r_i \cdot \Delta r_i)$$

r_i (10^{-2} m)	V_i (m / s)	Δr_i (10^{-1} m)	$V_i \cdot r_i \cdot \Delta r_i$ (10^{-6} m^3 / s)
0,20	3,33	0,02	13,32
0,40	3,30	0,02	26,40
0,60	3,28	0,02	39,36
0,80	3,20	0,02	51,20
1,00	3,16	0,02	63,20
1,20	3,08	0,02	73,92
1,40	2,95	0,02	82,60
1,60	2,78	0,02	88,96
1,80	2,50	0,02	90,00
2,00	2,05	0,02	82,00

Tabela IV

$$v = \frac{2}{\left(20{,}85 \cdot 10^{-3}\right)^2} \cdot \left(610{,}96 \cdot 10^{-6}\right)$$

$v \approx 2{,}81$ m/s , que é a velocidade média do escoamento.

3ª Possibilidade - Método Convencional Teórico.

Este método é aplicado a conduto forçado de seção transversal circular. Nesta condição, havíamos estudado na unidade 3, que:

- ***para o escoamento laminar*** o diagrama de velocidades pode ser representado pela função $v = v_{max} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]$, onde através do conceito da velocidade média, ou seja $V = \frac{1}{A} \cdot \int \bar{v}\, dA$, obtemos $v = \frac{1}{2} v_{max}$;

- ***para o escoamento turbulento*** o diagrama de velocidades foi representado pela função $v = v_{max} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7}$, que é comumente conhecida pela FÓRMULA DE PRANDTL, onde novamente recorrendo ao conceito de velocidade média temos: $v = \frac{49}{60} v_{max}$.

A fórmula de Prandtl apresentada para o escoamento turbulento, só é válida para número de Reynolds inferior a 10^5, genericamente o diagrama de velocidades é dado pela fórmula $v = v_{max}\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n}$, onde para $R_e > 10^5$ o n cresce.

Experimentalmente, obtemos uma tabela de V = f (r) e a partir da mesma, determinamos n graficamento, isto porque:

$$\frac{v}{v_{max}} = \left(\frac{R - r}{R}\right)^{1/n}$$

$$\ln \frac{v}{v_{max}} = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{R - r}{R}\right)$$

Através de um papel bilogarítmico, obtemos o diagrama representado pela figura 5.14, onde cotgθ = n .

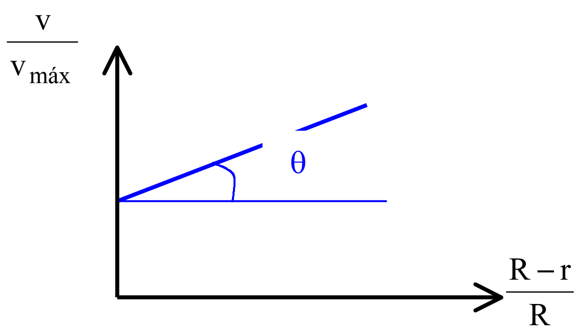


Figura 5.14

Após a determinação do número n, evocamos o conceito de velocidade média para sua determinação.

O tubo de Pitot é construido segundo norma, onde podemos citar como exemplo a NORMA ISO 3966 - 1977, onde as principais características estão representadas pelas figuras 5.15 e 5.16 .

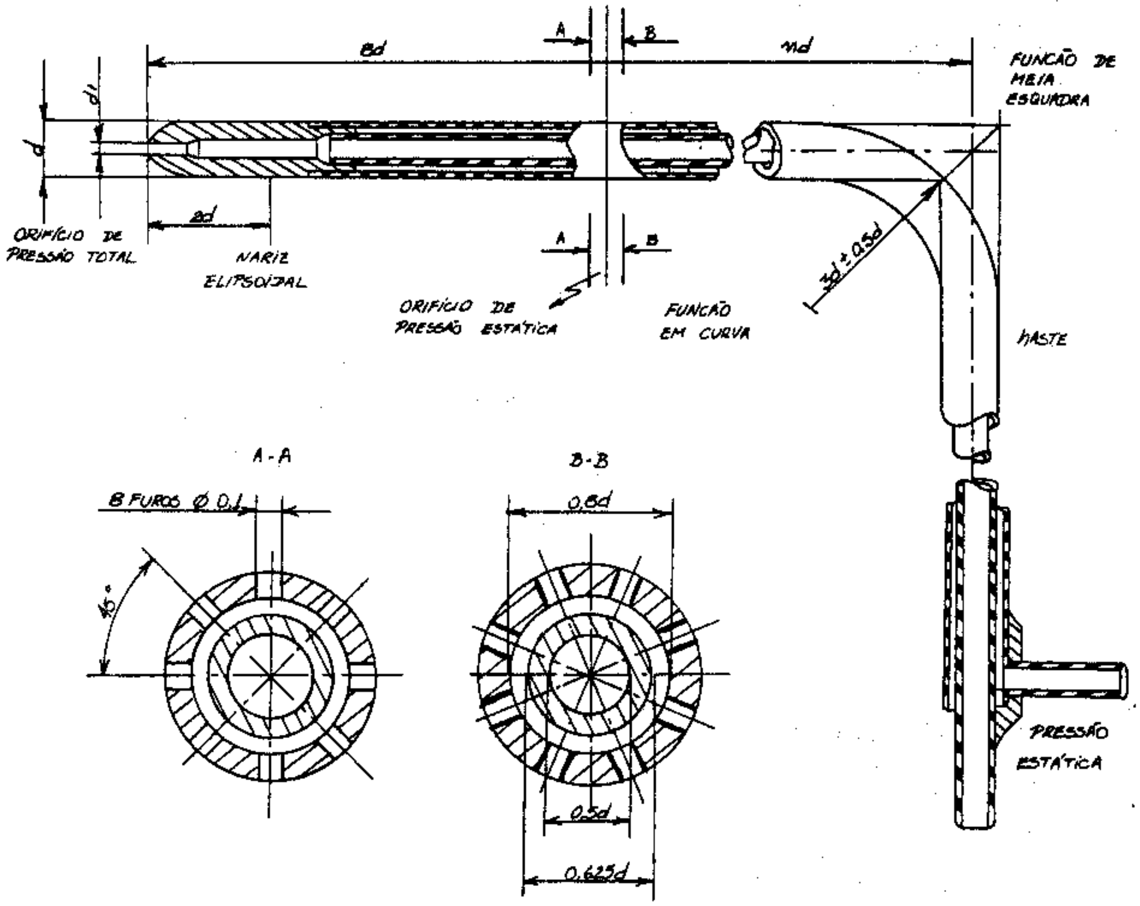


Figura 5.15

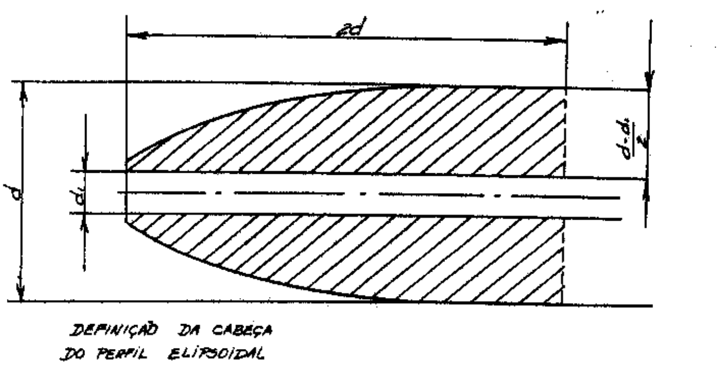


Figura 5.16