

MEDIDA DE PRESSÃO EM FLUIDOS EM MOVIMENTO

Até agora tratamos da medição de fluidos estáticos. Para fluidos em movimento podemos definir:

Pressão estática: é a pressão real do fluido. Seria medida idealmente por um sensor que acompanhasse o movimento do fluido. Pode-se mostrar que quando o escoamento possui linhas de corrente paralelas, não há variação de pressão ortogonal às linhas (desprezando-se efeitos hidrostáticos). Assim, a pressão estática pode ser medida por um pequeno furo na parede do tubo reto.

Pressão de estagnação: é aquela pressão obtida por uma sonda quando o fluido é desacelerado até o repouso por um processo isentrópico (sem atrito e sem transferência de calor).

Pressão dinâmica: é a pressão medida devido à energia cinética do fluido em escoamento.

Assim, $p_o = p_e + p_d$

onde: p_o : pressão de estagnação

p_e : pressão estática

p_d : pressão dinâmica

para um fluido incompressível:

$$p_o - p_e = \frac{1}{2} \rho V^2$$

para um gás perfeito em um processo isentrópico:

$$\frac{p_o - p_e}{\frac{1}{2} \rho V^2} = \frac{2}{kM^2} \left[\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right]$$

expandindo em série de Taylor:

$$\frac{p_o - p_e}{\frac{1}{2} \rho V^2} = 1 + \frac{M^2}{4} + \frac{k-2}{24} M^4 + \dots$$

vemos que quando $M \rightarrow 0$, $p_o - p_e = \frac{1}{2} \rho V^2$, incompressível.

Por exemplo, para $M = 0,2$

$$\frac{p_o - p_e}{\frac{1}{2}\rho V^2} \approx 1,01$$

ou seja, um desvio de 1% em relação à solução incompressível.

- **Medida de Pressão Estática**

As medições de pressão estática são utilizadas na determinação da perda de carga em dutos, na medição de vazão em instrumentos como placas de orifício ou Venturis e na medição de velocidade de fluidos em escoamento. Três modos de obter-se a pressão estática são utilizados:

- tomadas de pressão na parede que limita o escoamento
- tomadas de pressão em sondas
- tomadas de pressão em corpos aerodinâmicos

- **Tomadas de Pressão na Parede**

Em princípio, tomadas de pressão estática na parede devem ser feitas com furos de diâmetro muito pequeno, com cantos vivos e ortogonais à parede. Furos pequenos, no entanto, aumentam o tempo de resposta do sistema e estão sujeitos a entupimentos. Normalmente, furos com diâmetros da ordem de 1,5mm produzem um bom compromisso entre tempo de resposta e nível de perturbação do escoamento.

Uma geometria para tomadas de pressão estática recomendada é apresentada na figura abaixo.

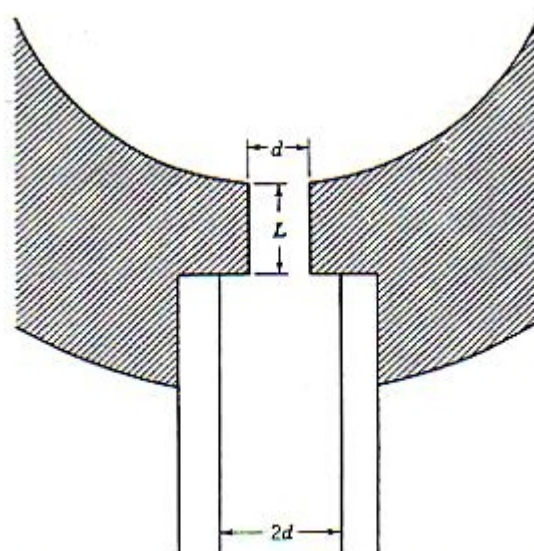


FIGURE 17.1 Recommended static-pressure wall-tap geometry, $1.5 < L/d < 6.0$.

Os efeitos do diâmetro da tomada de pressão podem ser avaliados na figura abaixo.

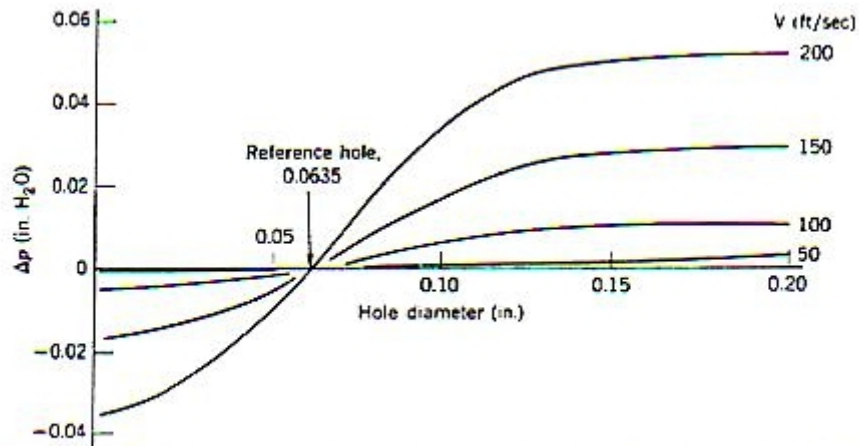
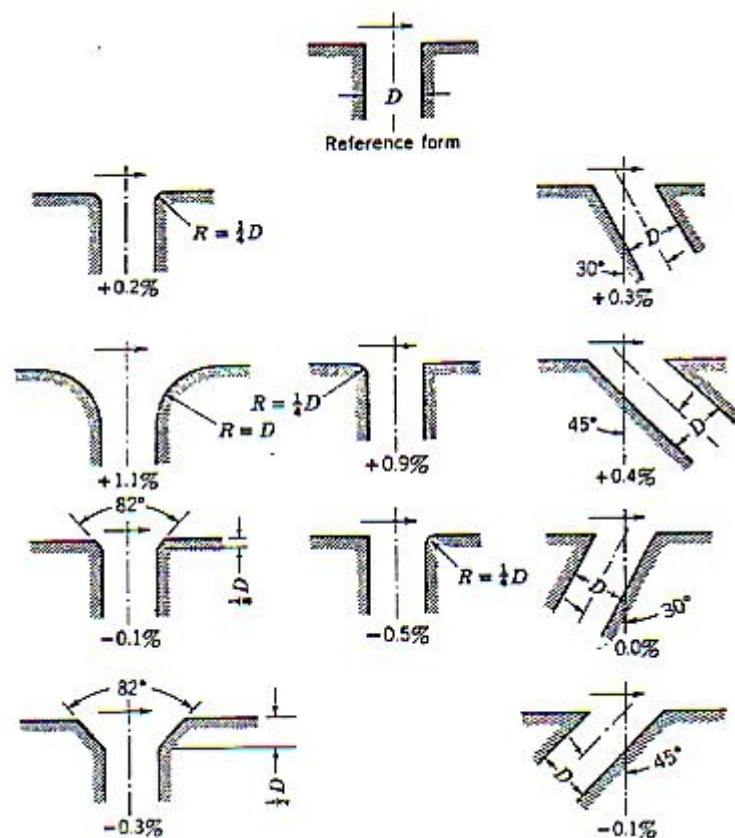


FIGURE 17.2 Typical experimental determination of hole size effect for $1.5 < L/d < 6.0$. (Source: After Shaw [9].)

A influência da forma e orientação das tomadas de pressão na medição de pressão estática estão resumidas na figura abaixo.



O erro na medição de pressão estática para escoamentos compressíveis é apresentado na figura abaixo.

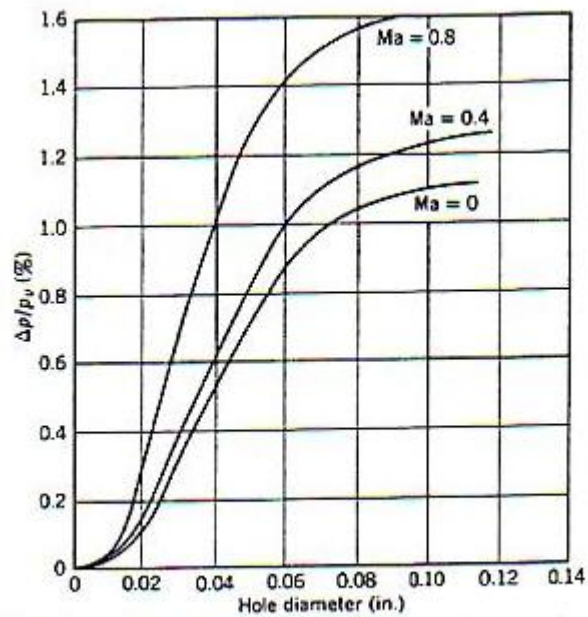
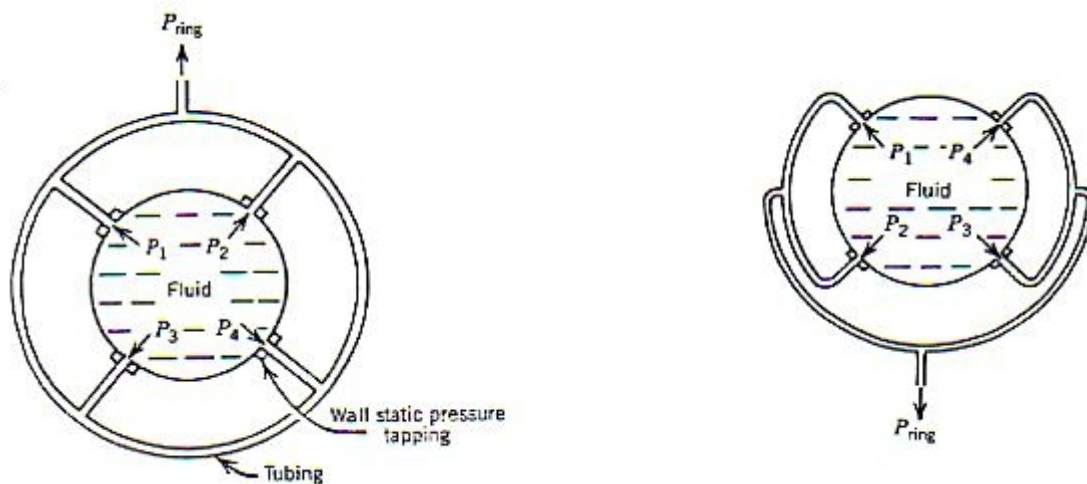


FIGURE 17.9 Wall tap errors for compressible flows. (Source: After Rayle [8].)

Muitas vezes a pressão estática é tomada em vários pontos de uma seção para obtenção de um valor médio.



▪ Tubos Estáticos

Também conhecidos como tubos de Prandtl, os tubos estáticos são utilizados na medição da pressão estática longe das paredes. A localização correta dos furos no corpo do tubo produz um balanceamento dos efeitos do nariz da sonda e de sua haste, de forma a produzir o valor correto da pressão estática. Uma configuração satisfatória utiliza 4 furos espaçados circunferencialmente de 90°, localizados a 5 diâmetros do nariz da sonda e a 15 diâmetros da haste.

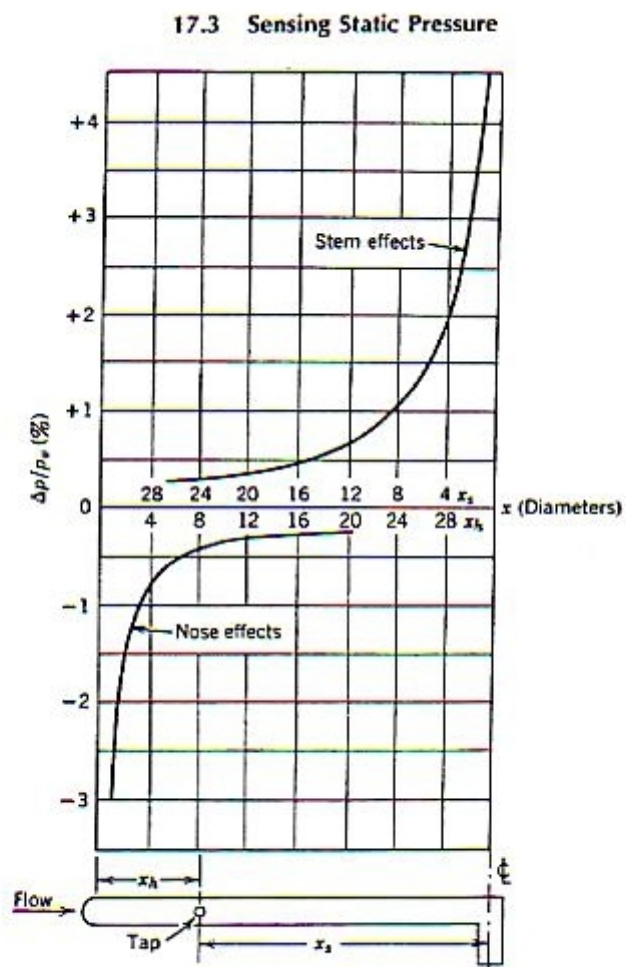


FIGURE 17.12 Static tube characteristics. x_s —position of taps from centerline of stem; x_n —position of taps from base of nose. (Source: From Dean et al. [41].)

▪ Sondas Aerodinâmicas

Corpos com formas aerodinâmicas podem ser utilizados na determinação da pressão estática. A localização dos furos é fundamental e é determinada por experimentos de calibração. O exemplo abaixo mostra uma sonda cilíndrica. O ângulo crítico θ^* é aquele no qual a pressão estática ocorre.

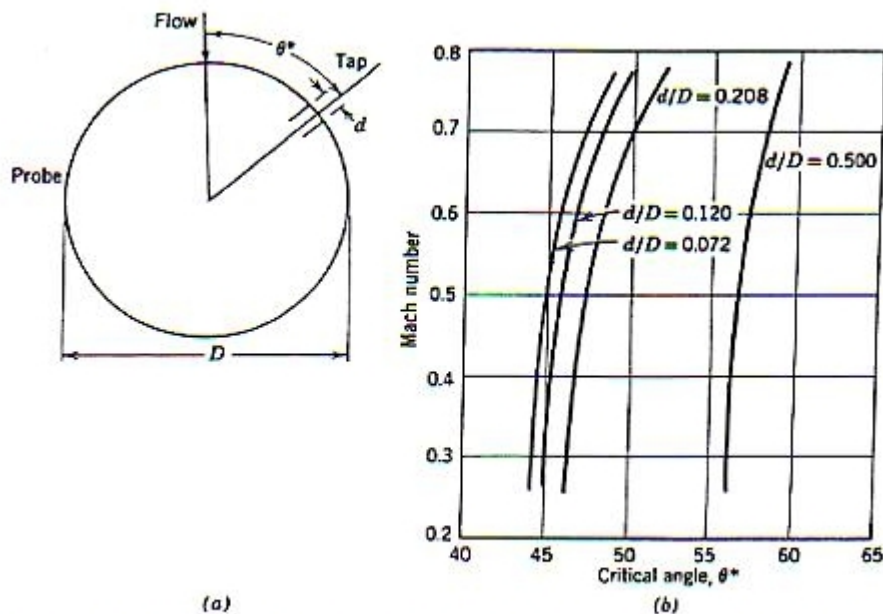
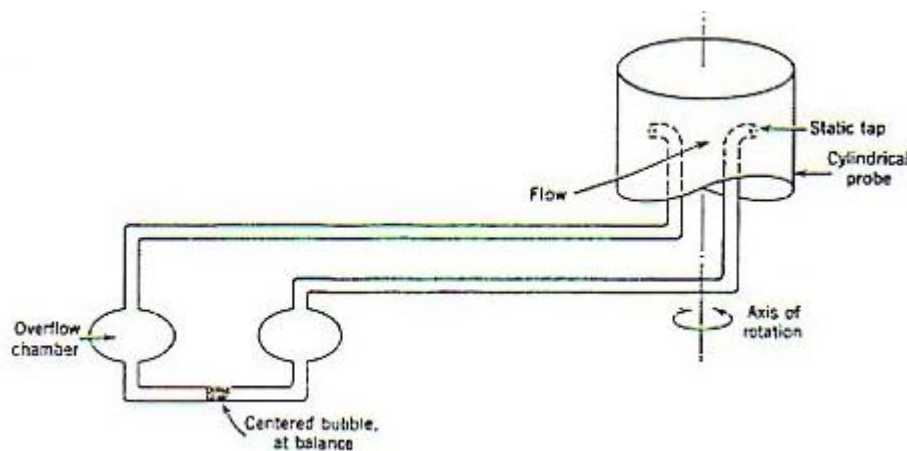


FIGURE 17.15 Critical angle. (d —tap diameter; D —probe diameter; θ^* —critical angle.) (a) Definition. (b) Typical variation with Mach number and diameter ratio.

Sondas cilíndricas com 2 furos podem ser usadas na determinação da direção do escoamento.



- **Medida de Pressão de Estagnação**

A medida de pressão de estagnação é útil na determinação da perda de energia em dutos, na medida de velocidade ou vazões.

Sondas para medida de pressão de estagnação podem ser construídas de diversas formas, como mostrado nas figuras. A sensibilidade ao alinhamento com o escoamento varia para cada modelo.

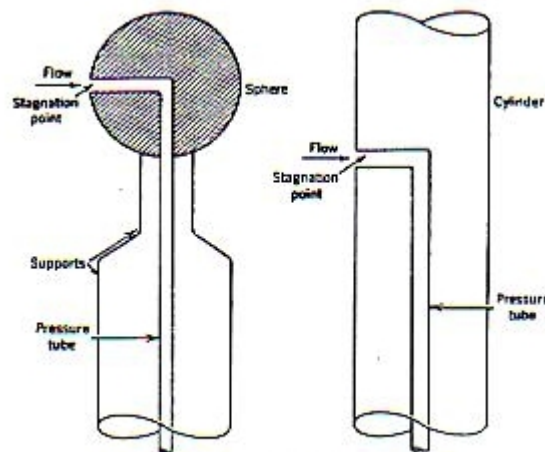


FIGURE 17.24 Aerodynamic total pressure probes.

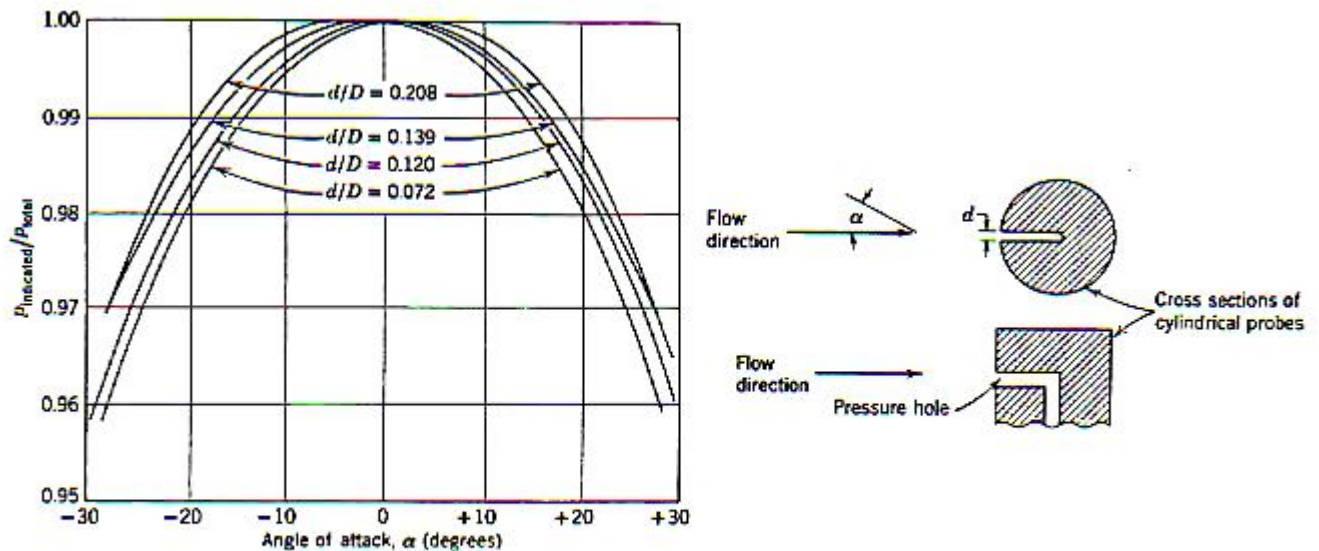


FIGURE 17.26 Variation of total pressure indication with angle of attack and hole size for cylindrical probes perpendicular to flow.

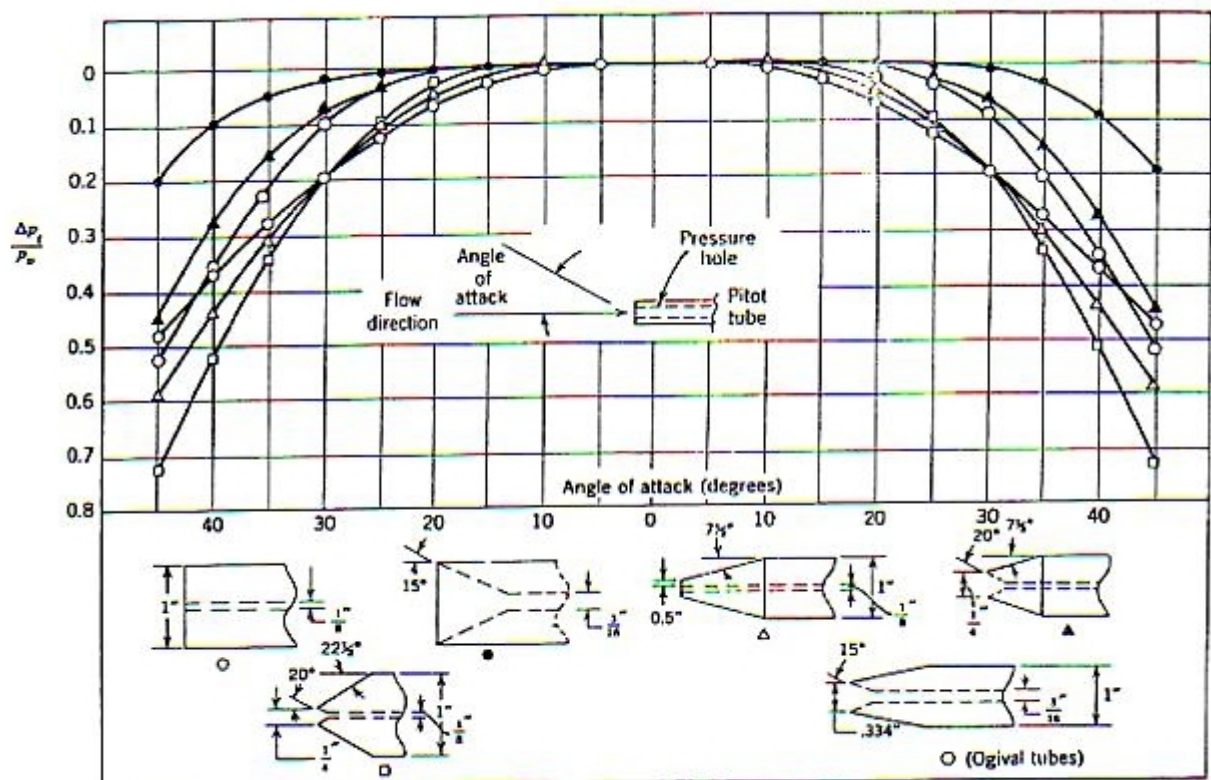
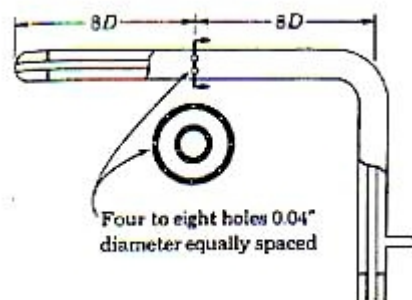
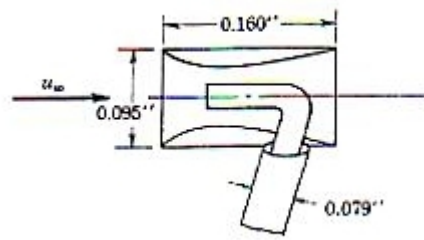


FIGURE 17.25 Characteristics of several Pitot tubes in regard to flow alignment. (Source: After Gracey et al. [29].)

O tubo Pitot/estático é muito utilizado na medida de velocidade.



A sonda Kiel diminui significativamente a sensibilidade da medição de pressão de estagnação à direção do escoamento.



Correções para efeitos viscosos devem ser aplicadas para baixos números de Reynolds. A figura abaixo mostra a dependência do coeficiente de pressão.

$$c_p = \frac{p_o - p}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

Com o número de Reynolds, baseado no raio do tubo

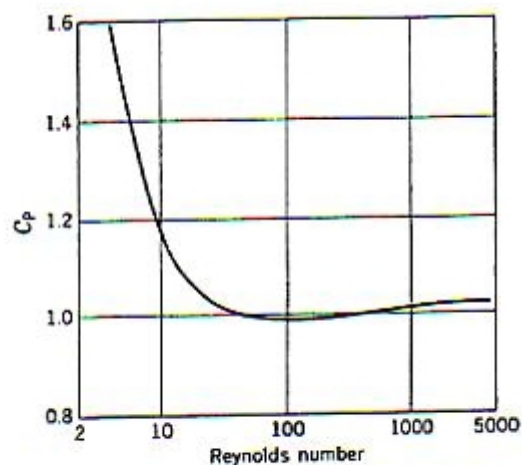
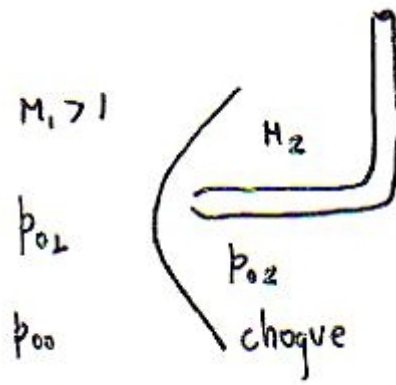


FIGURE 17.28 Viscosity effects on a Pitot tube. (Source: Hurd et al. [32].)

A medição de pressão de estagnação em escoamentos supersônicos requer correções. No caso da corrente livre ser supersônica, $M_1 > 1$, um choque se formará na frente da sonda e a pressão de estagnação medida não será aquela da corrente livre (antes do choque). É possível relacionar a pressão de estagnação lida na sonda com o número de Mach da corrente livre e a pressão estática da corrente livre, p_∞ .



$$\frac{p_{\infty}}{p_{01}} = \frac{\left\{ \left[2 \frac{k}{k-1} \right] M_1^2 - \frac{(k-1)}{(k+1)} \right\}^{1/(k-1)}}{\left\{ [(k+1)/2] M_1^2 \right\}^{k/(k-1)}}$$