

Metodologia para Calibração de Tubo de Pitot Cole Utilizando Anemometria LASER

Carlos Barreira Martinez, Luiz Augusto de Andrade, Jair Nascimento Filho, Edna Maria de Fria Viana, Luis Antonio Aguirre
Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH), (EHR / DEMEC / DELT) UFMG – Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901,
Belo Horizonte, MG, martinez@cce.ufmg.br, luiz7@ig.com.br, ednamariafaria@bol.com.br, jair@demec.ufmg.br

Marcelo Giulian Marques

Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH/UFRGS - Brasil. mmarques@ipb.ufrgs.br

Recebido: 19/11/02 – revisado: 09/01/03 – aceito: 21/01/04

RESUMO

A determinação da vazão aduzida em sistemas de condutos forçados, por exemplo, em uma usina hidrelétrica, é uma tarefa difícil de ser executada. Isto se deve a fatores como as dimensões físicas da instalação, as dificuldades de implementação de sensores no sistema e a existência de trechos fisicamente adequados para se executar a medição, etc. Dentre os diversos métodos existentes para a medição de grandes vazões o método de Pitot apresenta uma série de vantagens. Entretanto, a medição depende da calibragem do equipamento, que nem sempre é uma tarefa fácil de ser executada. Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia para a calibragem de tubos de Pitot utilizando-se anemometria LASER. Assim, descreve-se o princípio de funcionamento do tubo de Pitot, a bancada de testes utilizada para a realização dos ensaios, incluindo os principais acessórios que permitem a variação da vazão na seção de teste, o anemômetro LASER Doppler utilizado e o arranjo físico adotado nos ensaios de calibragem do tubo de Pitot, que no caso foi o Pitot Cole. Com os dados obtidos foi possível determinar o coeficiente do Tubo de Pitot. Foi possível também fazer o levantamento da influência do bocal do equipamento no campo de velocidade em volta do tubo de Pitot. Posteriormente, fez-se uma análise comparativa da expressão obtida nos ensaios com outra expressão extraída da literatura. Apresenta-se a metodologia desenvolvida para a análise das incertezas das medições de velocidades e vazões determinadas em laboratório.

Palavras Chave:: medição de vazão pitometria, pequenas centrais hidrelétricas.

INTRODUÇÃO

A medição da vazão em usinas hidrelétricas é feita com o objetivo de se determinar o rendimento do grupo gerador, ou seja, qual o valor de energia final (no caso elétrica) se está obtendo efetivamente em relação à energia potencial disponível em uma instalação com determinada queda disponível, H , e vazão, Q . Existem diversos métodos de medição de vazão. Dentre estes se destacam: os tubos de Pitot, sistemas de primogênios, medidores de vórtices, medidores de área variável, medidores turbinas e medidores eletromagnéticos, citados por Delméé (1982); método dos molinetes, método da cortina salina e método de Gibson, citados por ABNT/NB-228 (1978) e ABNT/NBR-11.374 (1990); método Winter-Kennedy, citado por Muller (1969) e Souza (1979), e medidores ultra-sônicos, citados por Voser et al. (1996) e Accusonic (1997). Dentre esses métodos, os mais indicados para serem utilizados para a medição da vazão em turbinas hidráulicas quanto à sua viabilidade de implementação são: método Pitot; método molinetes; método pressão por tempo (Gibson); método Winter-Kennedy;

método eletromagnético; e método ultra-sônico. Uma análise comparativa quanto ao desempenho dos seis métodos de medição de vazão supracitados (Andrade, 2002) demonstra vantagens competitivas para a utilização do método Pitot.

O método Pitot tipo Cole demonstra grande aplicabilidade e sua utilização torna-se especialmente atraente quando são considerados aspectos como: baixo custo de equipamentos, facilidade de instalação e manutenção; mão-de-obra pouco especializada; baixo tempo de implementação do sistema; baixa interferência no funcionamento da unidade geradora e segurança e integridade física do pessoal envolvido.

O TUBO DE PITOT

O tubo de Pitot foi o primeiro instrumento proposto para medir velocidade de fluidos. Entretanto, o dispositivo não mede diretamente a velocidade, mas determina uma grandeza mensurável que pode ser relacionada com a mesma. O tubo de Pitot trabalha com base neste princípio e é um dos métodos mais precisos de determinação de velocidades (Streeter, 1982). Os

primeiros tubos de Pitot eram bem rudimentares. Compunham-se de um tubo de vidro curvado em ângulo reto formando uma figura em L (FIG 1), provido de um bocal em forma de funil, que era colocado dentro do fluxo d'água.

Na FIG 1 (a), a pressão diferencial Δh é medida entre o nível do rio e o nível no tubo de vidro. Na FIG 1 (b), um tubo de referência ajuda a medida da leitura. A pêra P serve para diminuir a pressão em ambos os ramos do tubo em U invertido, elevando o nível nos mesmos.

O Tubo de Pitot Cole, objeto deste trabalho foi desenvolvido a partir de 1896 e tem como característica principal a facilidade de ser inserido dentro de uma tubulação a partir de um elemento de interligação (tap). Este tipo de tubo de Pitot tem sido largamente empregado em companhias de saneamento básico, devido à sua simplicidade e facilidade de inserção nas tubulações. Uma de suas principais características é possuir as tomadas de pressão posicionadas de forma diametralmente opostas como pode ser observado na FIG 2 (b). Trabalhos tradicionais (Cole, 1935) apresentam uma série de estudos que mostram a influência da inserção dos Tubos de Pitot em tubulações e os vários formatos de perfis de velocidade obtidos a partir de medidas em laboratório. Ao compararmos a FIG 2 (a), que apresenta um tubo de Pitot Cole, com o apresentado por Cole (1935), nota-se que o instrumento não sofreu modificações ao longo de quase cem anos.

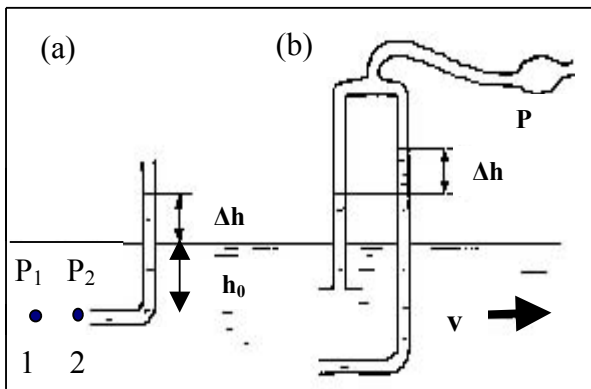


FIGURA 1 - Exemplos de tubos de Pitot simples para medir velocidade de rios. FONTE – Delmée, 1982.

A equação de Bernoulli, aplicada entre os ponto 1 e 2, (FIG 1 (a)), fornece a expressão:

$$\frac{V_1^2}{2.g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} = h_0 + \Delta h \quad (1)$$

Sendo:

g = aceleração da gravidade [m/s²];

Δh = altura da coluna de líquido [mca].

h_0 = altura de coluna de líquido sobre a tomada de pressão [m];

P_1 e P_2 = pressão nos pontos 1 e 2 [Pa];

V_1 = velocidade do fluido no ponto 1 [m/s];

γ = peso específico do fluido [N/m³].

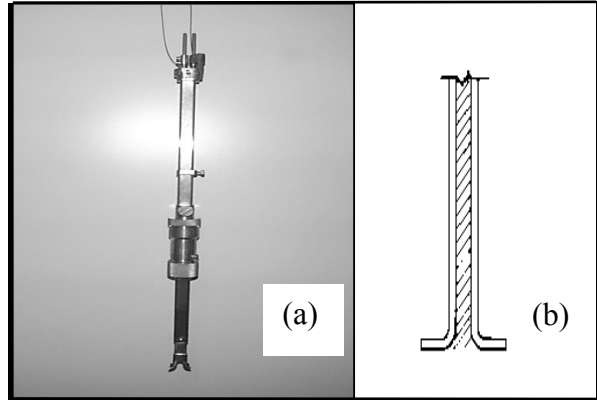


FIGURA 2 - Tubo de Pitot tipo Cole utilizado neste trabalho, (a). Esquema do Tubo Cole (Coelho 1983), (b).

Observando-se que a velocidade no ponto 2 é nula, e que a velocidade no ponto 1 é igual à velocidade a ser determinada, V , e como (P_1/h_0) , a equação (1) se reduz a:

$$\frac{V^2}{2.g} = \Delta h \quad (2)$$

ou

$$V = \sqrt{2.g.\Delta h} \quad (3)$$

A pressão de estagnação, também chamada pressão total, medida pelo Pitot compõe-se de duas parcelas, a pressão estática h_0 e a pressão dinâmica Δh , expressas em coluna do líquido que está escoando (FIG 1). No caso de escoamentos em condutos fechados a pressão estática será maior que a coluna de líquido representada por h_0 , em que o escoamento se dá em canal aberto. Ainda assim, poderá ser medida a diferença entre a pressão estática h_0 e a dinâmica, Δh . A pressão dinâmica está relacionada com a carga da velocidade pela expressão 2 ou 3. Combinando-se a medida da pressão estática e a medida da pressão total, por meio de um manômetro diferencial, obtém-se a altura correspondente à pressão dinâmica, Δh .

Usualmente, a velocidade do fluido é expressa em função da pressão diferencial e do peso específico do fluido. Introduzindo um coeficiente de correção, K_v ,

determinado em laboratório, em função da forma e posição dos orifícios do Pitot, resulta (Coelho, 1983):

$$V = K_1 \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{\Delta p}{\gamma}} \quad (4)$$

Sendo:

K_1 = coeficiente de correção do Pitot;

Δp = pressão diferencial [Pa].

Para compensar influências da forma da tomada de pressão do Pitot, para cada aparelho fabricado, o coeficiente de correção, que leva em consideração os efeitos de sucção lateral, deve ser definido em laboratório ou pelo fabricante (Coelho, 1983).

Pode-se, então, fazer uma exploração das velocidades locais de vários pontos de vários pontos de uma seção perpendicular de uma canalização fechada e aplicar a estes valores um tratamento adequado para, deles, deduzir a vazão. Este princípio de medição mede sempre a vazão do fluido escoando através de uma determinada seção perpendicular ao conduto.

Vários pontos de medição devem ser escolhidos ao longo de cada raio ou coordenada. Admitir-se-á que cada ponto de medição de velocidade seja representativo de uma área de influência.

Os pontos de medição devem ser espaçados de modo que as áreas de influência em forma de anel sejam iguais. Quanto mais distantes do centro do conduto estiverem, menores serão as distâncias entre os pontos de medição (na direção radial) e, em conseqüência, mais estreitos serão os anéis. Porém, a área será a mesma. Assim, a vazão em cada área, vai corresponder ao produto da velocidade em cada ponto, V_{pt_i} , pela área de cada seção, A_{seq_i} , multiplicados por um fator de ponderação¹, w_i e assim a vazão total, Q_T , será o somatório destas n vazões, como mostra a equação 5:

$$Q_T = \sum_{i=1}^n (V_{pt_i} \cdot A_{seq_i} \cdot w_i) \quad (5)$$

Sendo:

Q_T = vazão total [m³/s];

V_{pt_i} = velocidade do fluido no ponto i [m/s];

A_{seq_i} = área da seção medida [m²];

¹ Este fator de ponderação corrige a variação da área do tubo em função da influência causada pela presença do tubo de Pitot no escoamento e da projeção do sistema de acoplamento do Pitot ao tubo (tap), podendo variar de 0,93 a 0,99 em função do diâmetro do tubo, (Coelho, 1983).

n = número de pontos;

w_i = fator de ponderação do i -ésimo ponto.

Como a cada vazão corresponde um perfil de velocidade (Cole, 1934) o ponto em que a velocidade local coincide com a velocidade média varia com a vazão. Assim não é possível se estabelecer uma posição para o Pitot na qual a velocidade local coincida com a velocidade média em qualquer escoamento considerado. Estabelecida uma referência, é necessário realizar uma correção para o escoamento considerado usando-se o fator de velocidade (Coelho, 1983).

O tubo de Pitot escolhido para este estudo é do tipo Cole, pois este apresenta características de robustez e possui comercialmente uma ampla gama de acessórios que facilita o seu uso em tubulações de grande diâmetro.

METODOLOGIA

Foi feita uma comparação entre a medição de velocidade por meio do anemômetro LASER Doppler – LDA (LASER Doppler anemometer) e do sistema Pitot. Foi utilizado um procedimento de calibração, no qual o LDA foi considerado o padrão das medidas de velocidade.

A equação (4) pode ser expressa de maneira mais compacta como:

$$V_c = k' \cdot (\Delta h)^\alpha \quad (6)$$

que relaciona a pressão diferencial central, Δh [mca], captada pelo Pitot Cole com a velocidade central, V_c [m/s] (Martinez, 2000).

A velocidade obtida pelo Pitot Cole é tradicionalmente calculada através da equação empírica (6), que é largamente utilizada por companhias de saneamento básico com os seguintes valores de parâmetros:²

$$V_c = 3,8038 \cdot \Delta h^{0,4931} \quad (7)$$

Devido ao fato desta equação ser empírica e a forma de determinação dos parâmetros ser desconhecida, decidiu-se estimar tais parâmetros a partir de ensaios em laboratório utilizando-se como padrão um LDA.

² Esta equação empírica é largamente utilizada pela companhia de Saneamento Básico de Minas Gerais – COPASA e se origina da equação (4). De acordo com o pessoal técnico da empresa utilizou-se o coeficiente K_1 igual a 0,86 e a partir de uma série de medidas de campo se ajustou o valor que eleva o diferencial de pressão.

Para isso fez-se uma série de ensaios durante os quais coletaram-se dados de pressão diferencial usando-se um manômetro em U invertido e de velocidades obtidas através do LDA. Estes ensaios abrangeram uma extensa faixa de Re (Reynolds).

Usando-se os dados coletados e procedimentos de ajuste de curvas implementado em programa de computador Table Curve³, obtiveram-se novos valores para os coeficientes k' e α , da equação (6). Esses novos valores, bem como sua validação serão apresentados na seção de Resultados e Discussões.

A bancada de testes

A concepção da bancada de testes teve como principal objetivo possibilitar a execução de ensaios de medição de velocidades do fluido em escoamento utilizando o tubo de Pitot do tipo Cole e o sistema Anemômetro LASER Doppler, de modo que fossem atendidas as condições específicas requeridas para cada sistema de medição.

O esquema da bancada de testes pode ser visto nas FIG. 3, 4 e 5.

Os principais componentes da montagem são:

- Unidade de bombeamento constituída por uma motobomba EH, modelo EHF 80–12, 3500 rpm, rotor de 110 mm, vazão máxima nominal de 108 m³/h, altura manométrica de 6 mca.
- Tubulação flexível (mangote) de entrada e de saída da bancada com diâmetro nominal de 4 polegadas;
- Trecho de acrílico (seção de testes), com 1500 mm de comprimento, com diâmetro externo de 100 mm e 90 mm de diâmetro interno;
- Dois trechos de tubos de PVC (não comerciais), com 300 e 600 mm de comprimento, com diâmetro externo de 100 mm e 90 mm de diâmetro interno, para conexão do mangote ao tubo de acrílico;
- Adaptador tipo “Tap” instalado no tubo de acrílico para conexão rápida do Pitot; Manômetro “U” invertido, fundo de escala de 1000 mm, utilizado para medição da pressão diferencial gerada pelo Pitot;
- Inversor de freqüências, faixa de trabalho de 0 a 50 Hz, utilizado para alimentar o conjunto motobomba;
- Posicionador da sonda do LASER;

- Suportes de madeira para fixação do trecho de tubo à bancada.

Para a construção da bancada foi utilizada uma base rígida a fim de evitar possíveis interferências provocadas por vibrações no sistema, induzidas pelo escoamento ou outra fonte. A bancada é composta de um bloco de granito de 2400 mm de comprimento por 1500 mm de largura e 30 mm de espessura, suportada por uma estrutura metálica hiperestática (metalon 50x50). Uma vista esquemática da montagem pode ser vista na FIG. 3.

O registro Tap, para conexão do Pitot, foi instalado no terço médio do tubo em acrílico de modo a deixar o maior trecho reto para montante, como pode ser visto na FIG. 4. Desta forma, conseguiu-se um trecho reto de 1600 mm (1000 mm do acrílico, mais 600 mm do trecho de tubo de PVC) sobre a bancada. Assim a relação trecho reto em função do diâmetro é 17,7 a montante da seção de medição, estando esta quantidade bem próxima do valor superior sugerida por Coelho (1983), que é de 10 a 20 diâmetros do conduto. A montante deste trecho ainda existe um trecho de mangote de 1800 mm que permite elevar a relação de trechos retos / número diâmetro para 37,7, contribuindo para a estabilidade do escoamento na seção de medição. A jusante do Pitot existe um trecho reto de 1000 mm (500 mm em acrílico, 300 mm em PVC e 200 mm de mangote), que nos fornece uma relação trecho reto em função do diâmetro igual a 11,1 número maior que o sugerido por Coelho (1983), entre 5 e 10 diâmetros.

Na seção de teste foi utilizado um tubo de acrílico, FIG. 5, pois o LDA é um equipamento com princípio de funcionamento ótico e requer que o meio onde se executam as medidas seja transparente. Além disso, pode-se instalar o tubo de Pitot Cole de forma a se ter uma confirmação visual da sua posição. Outra vantagem é que o acesso visual permite a identificação do comportamento do sistema Pitot sob diferentes velocidades de escoamento (vibração do equipamento) e o tipo de escoamento presente.

O inversor de freqüência permitiu a variação da velocidade do conjunto motobomba, que permite variar a vazão no sistema. Desta forma evitou-se que instabilidades no escoamento fossem induzidas pela variação da vazão feita por meio do acionamento de registros. Outra vantagem na utilização do inversor de freqüência é que foi possível modular o experimento em 10 intervalos iguais de 0 a 50 Hz. Isto possibilitou a obtenção de 10 pontos de velocidade ao longo da faixa de medição.

Utilizando o LDA, foram feitas medições de velocidade próximas às tomadas de pressão a montante do Pitot. Diversos pontos próximos às tomadas de pressão do Pitot foram experimentados com o intuito de determinar à qual distância as hastes e entradas do Pitot

³ Table Curve 2D (trial version), <http://www.systat.com>

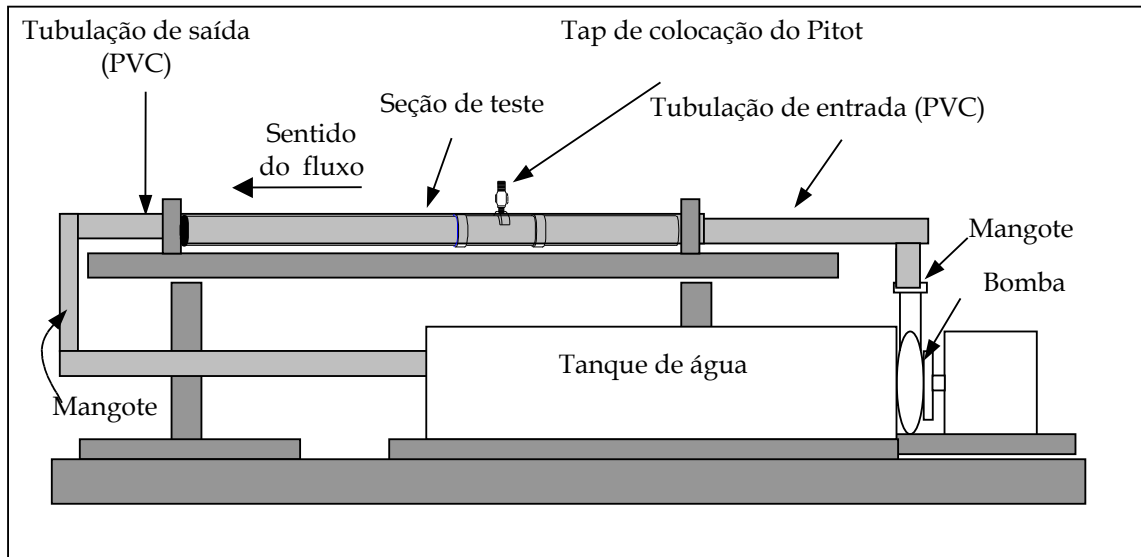


FIGURA 3 - Esquema da bancada de testes

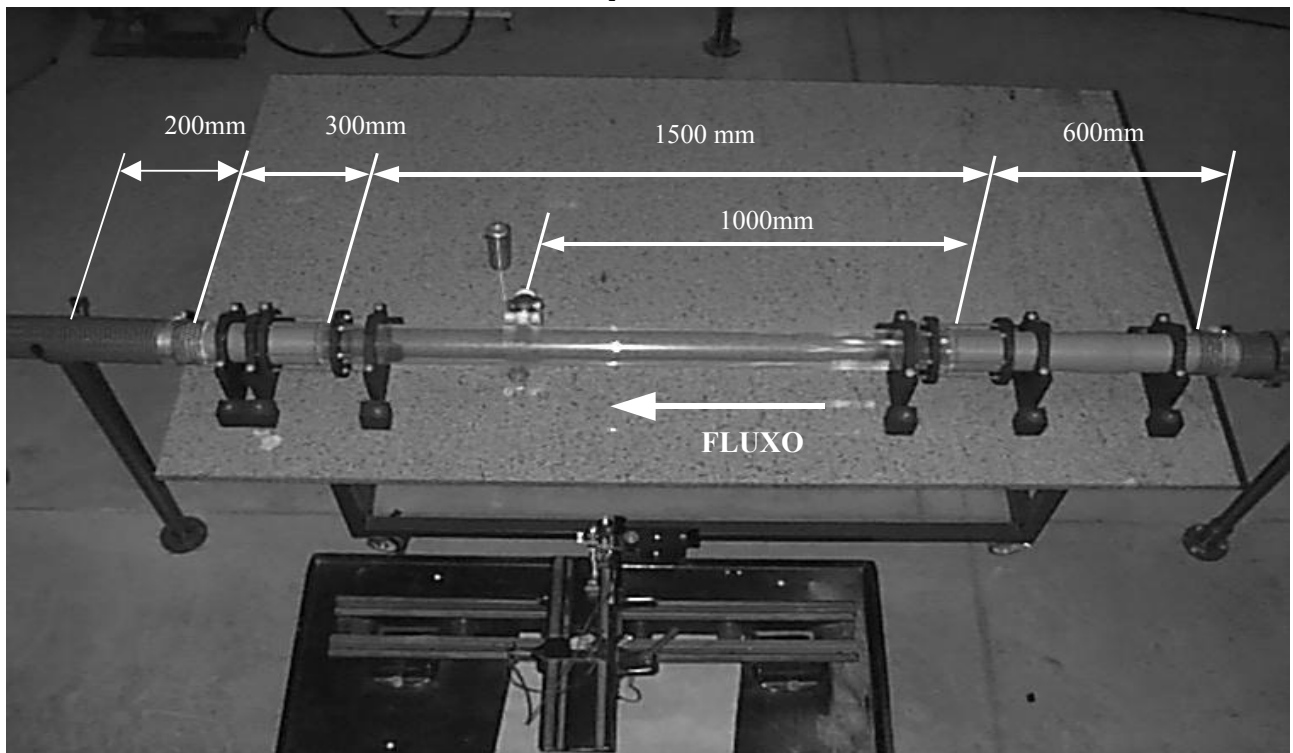


FIGURA 4 - Vista Geral da bancada de testes

não causariam mais interferência no fluxo. Estes pontos estavam localizados ao longo de uma linha reta que passa pelo centro do conduto, de modo que as linhas de fluxo medidas iam de encontro à tomada de pressão do Pitot. Diversos autores citam que estas distâncias devem se

localizar a pelo menos 20 vezes o diâmetro do tubo (Vennard, 1961).

O Pitot foi posicionado no centro da tubulação obtendo-se os dados de pressão estática e pressão de estagnação, captados pelas suas duas tomadas. Foram

feitas medições em toda a faixa de vazões disponível no sistema.

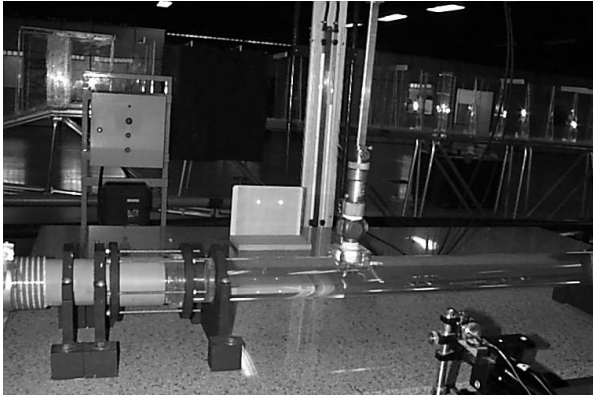


FIGURA 5 - Vista Geral dos equipamentos da bancada de testes

O Anemômetro LASER Doppler – LDA

O efeito Doppler é a aparente variação de frequência produzida pelo movimento relativo de um emissor e de um receptor de frequência. No caso, esta variação de frequência ocorre quando as ondas são refletidas pelas partículas móveis no fluido. O fluido deve ser semeado com finas partículas que são carregadas com a velocidade do mesmo.

O LDA utiliza deste princípio para medir velocidade de um escoamento. Uma única fonte gera o feixe de LASER de frequência f_0 que em seguida é dividido em dois feixes paralelos por um divisor de feixes. Estes dois feixes são então focalizados por uma lente convergente, de modo que se cruzem em um ponto do escoamento que se deseja medir a velocidade.

A interseção dos feixes produz um "volume de medida", FIG. 6 (a) e (b), onde o vetor \vec{V} representa a velocidade e direção de uma partícula, \vec{w} é a componente da velocidade na direção de interesse, e θ é o ângulo de separação entre os feixes, definido pela distância focal da lente. O cruzamento dos feixes de mesmo comprimento de onda, λ , produz franjas de interferência, que são a alternância entre regiões com presença de luz e regiões com ausência de luz, representadas na FIG. 6 (b) e (c).

Quando uma partícula, presente no fluido, atravessa o volume de medida, a luz espalhada apresenta um máximo de luminosidade quando passa por uma franja brilhante, sendo este sinal captado por um fotodetector de uma lente receptora.

A frequência deste sinal luminoso é função da velocidade da partícula, equação 8 (Dantec, 1995; Lima Filho, 1994; Nascimento Filho, 1997).

$$f_D = \frac{W}{\Delta z} \quad (8)$$

Sendo:

W = velocidade da partícula [m/s];

f_D = frequência Doppler do sinal gerado pela partícula ao cruzar o volume de medida [Hz];

Δz = distância entre franjas [m].

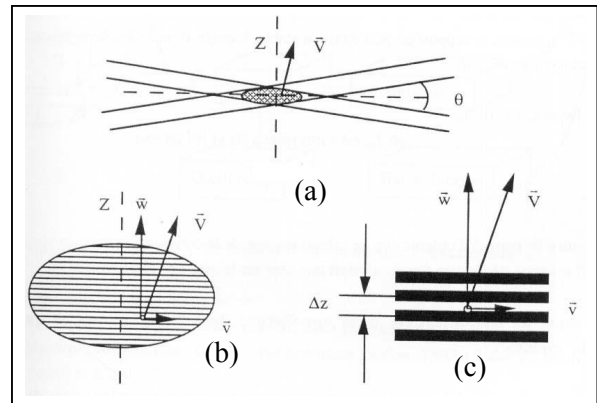


FIGURA 6 - Interseção dos feixes de LASER. FONTE – Nascimento Filho, 1997.

A distância entre cada franja de interferência, Δz , FIG. 6 (c), pode ser expressa a partir da equação 9 (Dantec, 1995; Lima Filho, 1994; Nascimento Filho, 1997):

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2}} \quad (9)$$

Com a ajuda das equações 8 e 9 obtém-se a expressão para a componente W da partícula (equação 10):

$$W = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2}} \cdot f_D \quad (10)$$

Sendo:

λ = comprimento de onda do feixe LASER [nm];

θ = ângulo de separação entre os feixes [rad].

Dentro de um esforço para simplificação, será chamada de velocidade (W) a quantidade obtida a partir da medição de frequência.

O termo $\frac{\lambda}{2 \text{sen} \frac{\theta}{2}}$ é conhecido como constante de calibragem do LDA e é função apenas do comprimento de onda do LASER e do ângulo de separação

ção entre os feixes, sendo independente da pressão, temperatura e densidade do fluido (Dantec, 1995).

Partículas viajando com velocidade $+W$ ou $-W$ geram o mesmo sinal de freqüência. Para identificar a direção da velocidade da partícula, utilizou-se um dispositivo chamado Célula de Bragg (modulador ótico-acústico). Este dispositivo defasa a propagação de um dos feixes de uma freqüência determinada, f_B , de modo que a diferença de freqüência entre os dois feixes causa um movimento na rede de interferência. Partículas viajando na mesma direção do movimento da rede de interferência produzem um sinal de baixa freqüência, f^- , do tipo:

$$f^- = f_B - f_D \tag{11}$$

Da mesma forma, partículas viajando na direção contrária ao movimento da rede produzem um sinal, f^+ , do tipo:

$$f^+ = f_B + f_D \tag{12}$$

A configuração do LDA utilizado nos ensaios é do tipo *backscattering*, em que tanto a fonte de emissão dos feixes de LASER, quanto a lente receptora estão do mesmo lado, montadas em uma sonda. A FIG. 7 ilustra esta configuração.

Na figura 7 pode-se observar que a lente mais externa (f) focaliza os feixes de LASER convergentes, gerando o volume de medida e direciona a luz dispersa pelas partículas que passam pelo volume de medida para a lente mais interna (g) que, por sua vez, a focaliza na entrada da fibra ótica (e) que transmite as informações ao fotomultiplicador (d).

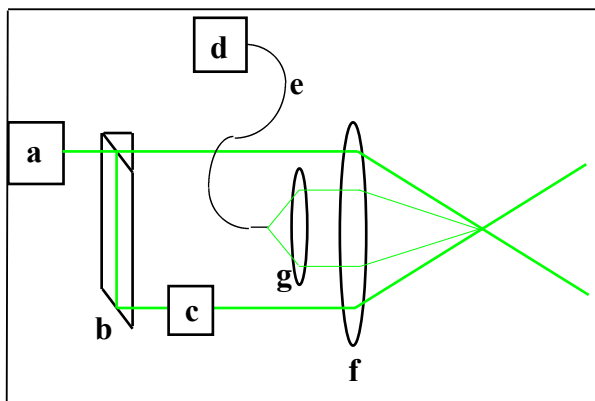


FIGURA 7 - Configuração utilizada pelo LDA. FONTE – Faria, 2000.

O LDA utilizado processa os sinais através de um analisador 58N40 conectado a uma placa DAS50 – Dantec.

A configuração do LDA é:

- Distância focal: 400mm;
- Separação dos feixes: 38mm;
- Diâmetro do feixe: 1,3 mm;
- Diâmetro do volume de medida: 0,248mm;
- Distância entre as franjas de interferência: 6,667 μm ;
- Número de franjas do volume de controle: 37;
- Comprimento de onda do Laser: 514,5 nm;
- Freqüência do Laser: 40 MHz.

Para a realização das medidas é necessário fazer a correção da localização do volume de medidas, observando-se os princípios da óptica para propagação dos feixes luminosos. Este princípio possui três características básicas:

- A luz se propaga em linhas retas através de feixes;
- Quando estes feixes são refletidos por uma superfície lisa o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão é igual;
- Quando um feixe atravessa a interface entre dois meios com diferentes índices de refração o feixe é desviado (refração).

Este desvio angular pode ser relacionado aos índices de refração de cada meio pela Lei de Snell, descrita na equação 13.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\beta)} \tag{13}$$

sendo que, n_1 e n_2 são os índices de refração, α é o ângulo de incidência e β é o ângulo de refração.

Os princípios de óptica citados foram aplicados às medições, realizadas com o LDA, considerando o fato de que a superfície em contato com o LASER é um tubo cilíndrico, e não uma parede reta. A seguir apresenta-se as dimensões do tubo de acrílico e o ângulo de ataque dos feixes de LASER.

- Dimensões do tubo de acrílico:
- Diâmetro interno: 90mm;
- Espessura da parede: 5mm;

➤ Ângulo de ataque do LASER calculado pela equação 14, FIG. 8 (Dantec, 1995; Lima Filho, 1994):

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{c}{d} \quad (14)$$

Sendo:

c = 19mm (características da lente utilizada no LDA);

d = 400mm (características da lente utilizada no LDA).

Desta forma encontra-se o ângulo de ataque $\theta / 2 \approx 2,72^\circ$.

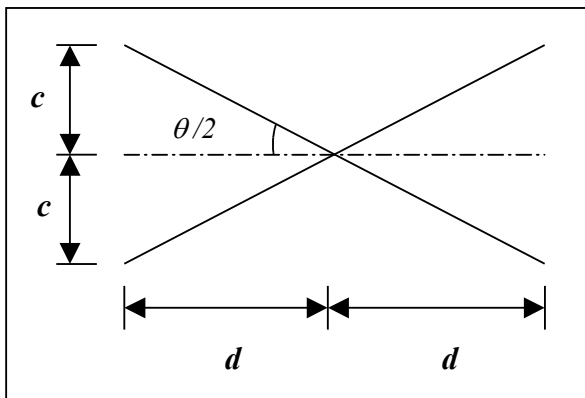


FIGURA 8 - Ângulo de ataque do LASER.

A análise da refração que ocorre na interface ar – acrílico – água levará à localização do primeiro ponto a ser medido. O cálculo da velocidade é feito a partir da média de velocidades das partículas que passam pelo volume de medida em um determinado tempo. Segundo o fabricante DANTEC (1995) o LDA não introduz erro sistemático. Isto é possível devido ao fato de se aplicar o feixe laser na linha de centro do tubo; assim o fabricante considera que não ocorrerão erros sistemáticos. No caso de se ter medidas fora da linha de centro, o fabricante sugere a colocação de uma caixa de acrílico (mesmo material da tubulação), preenchida com o mesmo tipo de fluido de trabalho. Desta forma pode-se corrigir distorção provocada pelo formato da parede. Erros aleatórios podem ser reduzidos aumentando-se o número de medidas executadas num mesmo intervalo de tempo (Faria, 2000).

Levantamento das medidas de velocidade com o Pitot e com o LDA

Para a determinação dos coeficientes do tubo de Pitot foi feito um ensaio utilizando dois sistemas de medição operando em série: o sistema Pitot e o LDA. Tanto o sistema Pitot quanto o volume de medida do LDA foram posicionados no centro do conduto, como ilustra a figura 9. Foram levantadas as pressões diferenciais produzidas pelo Pitot, medindo-se as deflexões no manômetro “U” invertido. Em seguida, foram feitas medidas de velocidade com o LDA nos mesmos pontos, para dez valores distintos de vazão. Esses valores correspondem à variação da frequência do inversor de 5 a 50 H_z , de 5 em 5 H_z , e uma faixa de vazão entre 1,71 e 8,31 l/s. É importante dizer que as medidas não foram feitas ao mesmo tempo, mas sim nos mesmos pontos.

Para cada valor de vazão, mediu-se a respectiva velocidade central com o LDA. Também foram feitas 30 medições independentes com o sistema Pitot. Esse grupo de medidas de pressão diferencial posteriormente foi utilizado para uma análise de incertezas dessas medições. Assim obteve-se um banco de dados utilizado para o cálculo dos coeficientes do Pitot Cole. A FIG. 9 ilustra o procedimento utilizado.

As medidas de velocidade foram feitas em 6 pontos, alinhados com a tomada frontal do Pitot, ao longo do eixo do conduto, com o objetivo de verificar o comportamento das velocidades nas proximidades do Pitot, conforme apresentado na figura 9.

TABELA 1 - Distância entre o Pitot e o ponto de medição da velocidade com o LDA.

Ponto	Distância do Pitot [mm]
1º	~2
2º	20
3º	50
4º	100
5º	150
6º	200

Inicialmente, o volume de medida foi posicionado aproximadamente a 2mm da tomada Pitot para a medição do primeiro ponto. O segundo ponto foi medido a uma distância de 20mm, como exemplifica a FIG. 9. Os outros 4 pontos foram medidos a 50mm, 100mm, 150mm e 200mm.

Os dados das velocidades medidas pelo LDA estão nas TAB. 1 e 2. O desvio padrão das medidas é chamado nas Tabelas de RMS.

TABELA 2 - Medidas de velocidade no centro do tubo, obtidas com o LDA

<i>Frequência de alimentação do inversor [Hz]</i>	<i>Ponto</i>	<i>Velocidade média [m/s]</i>	<i>RMS</i>	<i>Frequência de alimentação do inversor [Hz]</i>	<i>Ponto</i>	<i>Velocidade média [m/s]</i>	<i>RMS</i>
5 1.17 1/s	1º	0,115	0,123	10 1.42 1/s	1º	0,264	0,187
	2º	0,279	0,083		2º	0,594	0,171
	3º	0,265	0,09		3º	0,572	0,196
	4º	0,321	0,224		4º	0,546	0,283
	5º	0,328	0,171		5º	0,628	0,206
	6º	0,326	0,240		6º	0,631	0,305
15 1.73 1/s	1º	0,402	0,249	20 2.29 1/s	1º	0,626	0,300
	2º	0,898	0,205		2º	1,186	0,192
	3º	0,854	0,219		3º	1,125	0,262
	4º	0,744	0,341		4º	1,062	0,398
	5º	0,831	0,293		5º	1,148	0,271
	6º	0,804	0,368		6º	1,047	0,443
25 2.90 1/s	1º	0,646	0,402	30 3.55 1/s	1º	0,749	0,439
	2º	1,483	0,183		2º	1,771	0,246
	3º	1,347	0,322		3º	1,675	0,371
	4º	1,367	0,430		4º	1,589	0,537
	5º	1,423	0,322		5º	1,667	0,422
	6º	1,316	0,495		6º	1,680	0,473
35 4.14 1/s	1º	0,816	0,513	40 4.67 1/s	1º	0,975	0,586
	2º	2,069	0,204		2º	2,352	0,271
	3º	1,861	0,447		3º	2,252	0,424
	4º	1,748	0,715		4º	2,121	0,720
	5º	1,875	0,473		5º	2,256	0,448
	6º	1,879	0,658		6º	2,005	0,892
45 5.60 1/s	1º	1,095	0,652	50 8.31 1/s	1º	1,057	0,729
	2º	2,665	0,224		2º	2,933	0,413
	3º	2,525	0,510		3º	2,830	0,475
	4º	2,376	0,751		4º	2,808	0,574
	5º	2,547	0,525		5º	2,830	0,576
	6º	2,492	0,652		6º	2,829	0,658

partir do LDA) em função da distância do ponto de medição e é apresentado na FIG. 11.

Pode-se verificar que as velocidades permanecem estáveis a partir de uma distância de 50mm, no caso o terceiro ponto de medida. Devido a este motivo, a média das velocidades lidas pelo LDA foi calculada utilizando-se apenas os quatro últimos pontos de cada série, ou seja, os pontos posicionados a 50mm, 100mm, 150mm e 200mm.

TABELA 3 - Medidas processadas de velocidade e de pressão diferencial

<i>V</i> azão [l/s]	Δp Pitot [ca]	médio [mm- ca]	Velocidade LDA [m/s]	Valor de <i>k</i>
1,17	8,5		0,31	0,0240
1,42	31,2		0,59	0,0238
1,73	68,6		0,80	0,0218
2,29	121,5		1,09	0,0223
2,90	191,0		1,36	0,0222
3,55	275,6		1,65	0,0224
4,14	375,1		1,84	0,0214
4,67	488,7		2,15	0,0220
5,60	616,4		2,48	0,0226
8,31	754,9		2,82	0,0232

Os dados de medidas de velocidade obtidas pelo LDA e os dados de pressão diferencial obtidos pelo Pitot foram processados, e estão apresentados nas TAB. 3.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com o ensaio do tubo de Pitot Cole, juntamente com as medições de velocidade obtidas com o LDA permitiram a obtenção dos coeficientes do Pitot.

A partir dos dados processados e analisados, foi construído um gráfico das pressões diferenciais em função das velocidades, FIG. 12. Utilizando-se o software Table Curve, foi obtido o ajuste dos pontos do gráfico a uma equação matemática, semelhante à equação 7. Posteriormente foi verificado que o erro vinculado a velocidade calculada pela expressão é da ordem de 2,5% do valor lido para o ponto $\Delta p_c = 754,9\text{mm}$.

Assim, a expressão 15 pode ser utilizada para se determinar a velocidade pontual de um escoamento, a partir de medidas de pressão diferencial captadas por um Pitot tipo Cole, definidas para um intervalo de confiança de 99%. Por exemplo, para cada medida feita em torno de $\Delta p_c = 750\text{mm}$, existe 99% de probabilidade do valor

calculado pela expressão apresentar um erro menor que 2,5%.

$$V_c = 0,0937 \cdot \Delta p_c^{0,51} \quad (15)$$

Se utilizarmos a definição da expressão 4 para considerarmos o efeito da aceleração da gravidade no local da medição teremos a expressão 16. O coeficiente *k* varia na faixa entre 0,0214 e 0,0240, sendo que o seu valor médio é 0,0227. A aceleração da gravidade adotada é de 9,81 m/s².

$$V_c = 0,0227 \cdot \sqrt{2g \Delta p_c} \quad (16)$$

Na TAB. 4, são apresentados os dados comparativos entre as equações 7, 15 e 16. Foram utilizados como dados de entrada as mesmas pressões diferenciais utilizadas para o ajuste da curva, Δp médio, da TAB. 3.

Da TAB. 4 observa-se que o erro percentual obtido pela expressão 15 situa-se na faixa de 2 a 4%, chegando a pouco mais de 10% para as baixas velocidades. Já a expressão 7 apresenta erro percentual na faixa de 18 a 22%, chegando a mais de 27%, sendo que a maior parte dos valores são, pelo menos, 5 vezes maiores que o erro apresentado pela expressão 15.

A expressão 16 apresenta erro percentual entre -5,62% e 5,79%.

Portanto, as expressões 15 e 16 demonstram uma maior confiabilidade, em relação à equação 7, podendo ser então utilizadas para o cálculo de velocidades a partir de pressões diferenciais captadas por um Pitot do tipo Cole. Sendo que a expressão 16 permite que se considere o efeito da aceleração da gravidade no local onde estão sendo feitas as medições.

Considerando-se a velocidade obtida pelo LDA como um padrão e a correlação dos dados obtidos na tabela 3, obtém-se um coeficiente *k* da ordem de 0,7033 (para dados de pressão diferencial em metros). Nota-se que este valor é um pouco menor que o calculável pela equação 16 (aproximadamente 0,718). Se compararmos estes valores com os apresentados por Streeter (1982), podemos notar que possuem a mesma ordem de grandeza.

Sugere-se que os trabalhos sejam ampliados para outros tipos de tubos de Pitot de forma a se ter um melhor mapeamento destes equipamentos, inclusive com a determinação da área de interferência no escoamento causada pela ação do tubo de Pitot. Também sugere-se que a bancada de testes seja reformulada ficando com uma seção de medida com paredes planas, o que facilitará a realização das medidas e reduzirá o efeito de distorções provocadas pela curvatura do tubo cilíndrico.

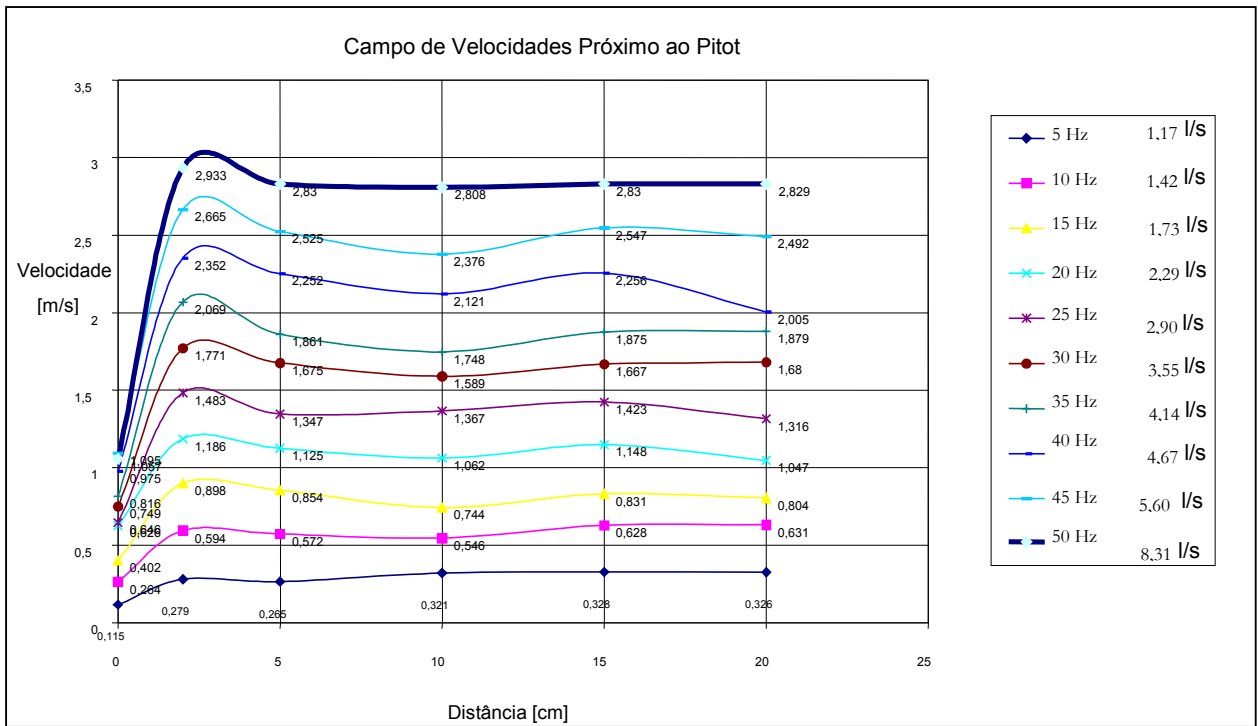


FIGURA 11 - Medidas de velocidade (LDA) em função da distância do tubo de Pitot

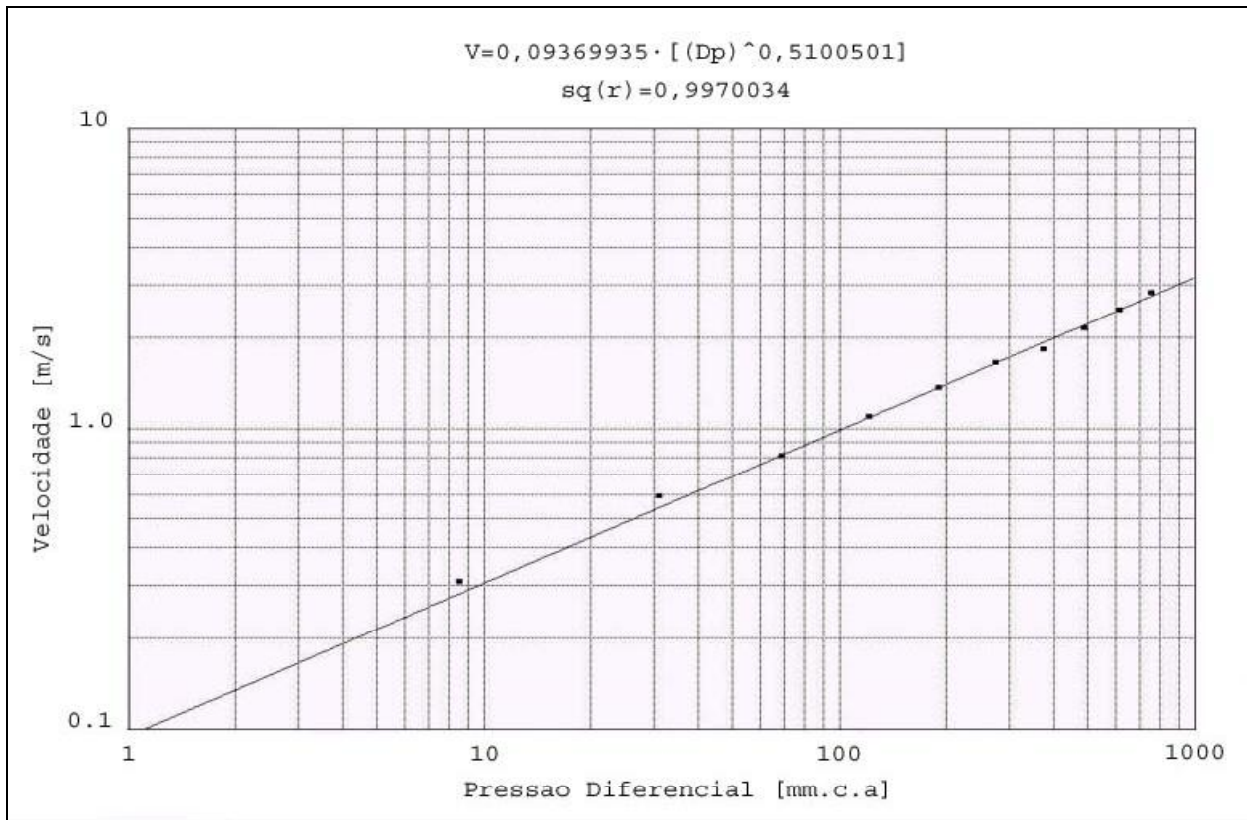


FIGURA 12 - Ajuste da curva dos coeficientes do Pitot

TABELA 4 - Análise comparativa entre as expressões dos coeficientes do Pitot Cole

Dados de referência	$V_c = 0,0937 \cdot \Delta p_c^{0,51}$ (15)			$V_c = 0,0227 \sqrt{2g\Delta p_c}$ (16)			$V_c = 3,8038 \cdot \Delta p_c^{0,4931}$ (7)		
	Entrada de dados em [mm]			Entrada de dados em [mm]			Entrada de dados em [m]		
Velocidade LDA [m/s]	Velocidade determinada [m/s]	Erro	Erro % da expressão ajustada	Velocidade determinada [m/s]	Erro	Erro % da expressão ajustada	Velocidade determinada [m/s]	Erro	Erro % da expressão ajustada
0,310	0,278	-0,031	-10,14	0,292	-0,017	-5,62	0,361	0,052	16,68
0,594	0,541	0,052	-8,83	0,561	-0,033	-5,49	0,688	0,094	15,80
0,808	0,809	0,002	0,19	0,832	0,025	3,04	1,014	0,207	25,56
1,095	1,083	-0,012	-1,06	1,108	0,013	1,17	1,345	0,250	22,80
1,363	1,365	0,002	0,14	1,389	0,026	1,93	1,681	0,318	23,34
1,652	1,645	-0,007	-0,41	1,669	0,016	1,00	2,014	0,362	21,90
1,840	1,926	0,085	4,64	1,947	0,107	5,79	2,345	0,505	27,42
2,158	2,204	0,046	2,12	2,222	0,064	2,97	2,672	0,514	23,80
2,485	2,481	-0,004	-0,15	2,496	0,011	0,45	2,996	0,511	20,58
2,824	2,751	-0,072	-2,57	2,762	-0,062	-2,18	3,311	0,487	17,25

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina, situada à Praça Rui Barbosa, nº 80, Centro, Cataguazes / MG, CEP 36.770.000; a Companhia de Eletricidade de Nova Friburgo, situada à Av. Euterpe Friburguense, nº 111/113, Centro, Nova Friburgo / RJ, CEP 28.605.130; e a Universidade Federal de Minas Gerais, situada à Av. Antônio Carlos 6227, Belo Horizonte MG. CEP 31 270-901 (por meio de convênio de Desenvolvimento Científico e Tecnológico apoiado pela Aneel: “Relatório do Programa Anual de Pesquisa e Desenvolvimento Ciclo 1999/2000 – Fundação Cristiano Ottoni / Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina”) pelo apoio recebido neste projeto.

REFERÊNCIAS

ACCUSONIC. *Multipath flowmeter systems theory and operating principle*. Catálogo 1. Massachusetts: Accusonic Technologies Inc., 1997.

ANDRADE, Luiz Augusto. *Calibração de tubo de Pitot Cole para a medição de grandes vazões utilizando anemometria LASER*. 125 p. Dissertação (Mestrado em Calor e Fluidos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NB-228: ensaios de recepção de turbinas hidráulicas*. Rio de Janeiro, jan. 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR-11.374: turbinas hidráulicas ensaio de campo*. Rio de Janeiro, maio 1990.

COELHO, Adalberto Cavalcanti. *Medição de água e controle de perdas*. 2. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, fev. 1983.

COLE, Edward. S. *Pitot-Tube Practice*. Transactions of The American Society of Mechanical Engineers, pg 281-294, New York, 1935.

DANTEC. *Fiber flow installation & user's guide*. Dantec Measurement Technology A/S. SKovlunde. Denmark. oct. 1995.

DELMÉE, Gérard Jean. *Manual de medição de vazão*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

- LIMA FILHO, Severiano da Silva. *Influence du transfert massique sur les champs thermique et dynamique. étude expérimentale et modélisation.* 1994. 133 p. Thèse (Doctorat en Energétique) - Laboratoire Étude des Systèmes et de l'Environnement Thermique de l'Homme (L.E.S.E.T.H.), l'Université Paul Sabatier, Toulouse.
- MARTINEZ, Carlos Barreira; AGUIRRE, Luis Antonio. *Desenvolvimento de um indicador de pressão diferencial para medição de vazão na presença de elevadas pressões em modo comum.* set. 2000. 47 p. Relatório técnico. Departamentos de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos / Engenharia Eletrônica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- MÜLLER, Hans Paul. *Measurement of the pressure in the spiral casing.* Voith Research and Construction, Vol. +19e, Paper 4, 1969.
- NASCIMENTO FILHO, Jair. *Transferts de masse et de chaleur par convection naturelle dans une cavité a rapport de forme voisin de l'unité.* Thèse. Université Paul Sabatier. 1997. 122 f. Thèse (Doctorat en Energétique) - Laboratoire Étude des Systèmes et de l'Environnement Thermique de l'Homme (L.E.S.E.T.H.), l'Université Paul Sabatier, Toulouse.
- SOUZA, Zulcy. *As bases teóricas do método Winter Kennedy para medição de vazão em máquinas de fluxo.* Laboratório Hidromecânico, Escola Federal de Itajubá, Paper 1, 1979.
- STREETER, Victor L.; WYLIE, E. Benjamin. *Mecânica dos fluidos.* Tradução de Milton Gonçalves Sanches. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982. 585 p. Original inglês.
- VENNARD, John K. *Elementary fluid mechanics.* 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1961.
- VOSER, A.; BRUTTIN, Ch.; PRÉNAT, J.-E.; STAUBLI, T. *Improving acoustic flow measurement.* International Water Power & Dam Construction, 1996.

The results discussed concern a Cole Pitot tube. The main coefficient of this device was estimated from test data. A major concern throughout the work was how the presence of the Pitot tube would influence the velocity vector field in the neighborhood of the stagnation pressure point. The results obtained are compared and discussed in the light of well-known results established in the literature. Preliminary results on confidence intervals for the measured velocity and flow are also presented and discussed.

Keywords. Flow measurement, Pitot tubes, hydroelectric power plants.

Calibration Method For a Cole Pitot Tube Using Laser Anemometry

ABSTRACT

To measure the inlet flow in closed systems, such as the inlet flow of a turbine in an electrical power plant, is a typically difficult task. There are several reasons for this, ranging from the size of the piping involved to the difficulty of finding an adequate position to install measuring devices (sensors) and the installation itself. Among several flow measurement methods, the Pitot tubes present a number of advantages. Calibration of this device, however, is far from trivial. The main goal of this work is to describe a framework to calibrate Pitot tubes using a LASER Doppler anemometer as a standard. The aforementioned description details the main parts of the laboratory setup and also the procedures followed during the calibration tests.