

Estudo do tubo de Pitot

APRESENTAÇÃO E SÍNTESE

O artigo Tubo de Pitot, calibrar ou não calibrar, tem por finalidade demonstrar de maneira Teórica, Estatística e Prática, a não necessidade de enviar seu tubo de Pitot para certificação ou simplesmente para Laboratório de vazão efetuar sua calibração, mesmo depois de uma manutenção, troca ou reparo dos TIPS. Iremos demonstrar nesse trabalho, tal postulado através de:

- A) Equações matemáticas pertinentes,
- B) Análise estatística de diversos certificados de calibrações,
- C) Resultados práticos obtidos da medição de velocidade fluídica em mesa de ensaio de vazão, “com água”, nas mais diversas condições de deformação dos “Tips”.

Diante dos fatos acima e seus respectivos resultados, achamos que a calibração não é necessária, senão, uma perda de tempo e um gasto desnecessário, porem, ela não prejudica e nem invalida a calibração ou a performance do tubo. Daí, a decisão de calibrar ou não é vossa ou de sua Empresa.

TUBO DE PITOT – Calibrar ou não Calibrar

Há necessidade de Calibração do Tubo de Pitot em Laboratório de Certificação?

Segue breve relato sobre calibração tubo de Pitot Cole, com comentários extraídos do livro “Pitometria e Macro Medição nas Empresas de Saneamento”. Trata-se de um parecer do autor fundamentado na teoria e em experiências praticas onde se observou e estudou o tubo de Pitot como um elemento primário de vazão, utilizado em mesa de ensaio, em medição nas empresas, ou em treinamento de Pitometria na pratica.

Voltando no ano de 1732, quando Henry Pitot fez seus experimentos práticos com um tubo de vidro curvado à 90° para medição da velocidade de rio e canais com caimento gravitacional. Ali, naquele experimento, nascia o tubo de Pitot que hoje conhecemos. A figura abaixo, ilustra tal experimento, mostrando as equações pertinentes a tal evento.

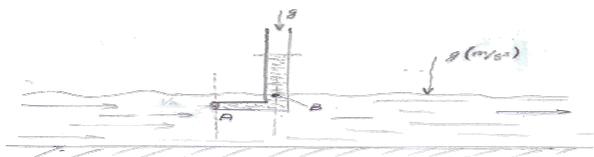


Fig. 1

Na Figura 1, temos um canal ou Rio escoando com uma velocidade V . Imaginando inicialmente que sua velocidade seja $V=0$, tendo o tubo sido instalado

Estudo do tubo de Pitot

próximo a sua superfície e na posição vertical frontal, podemos afirmar que o nível do fluido dentro do tubo, ficara exatamente igual ao nível do canal.

Quando a velocidade do canal for diferente de zero, teremos vetorialmente uma energia cinética ou de velocidade impactando na ponta do tubo. Tal energia cinética ou energia de velocidade do canal se transformara em energia de pressão, fazendo com que o fluido suba dentro do tubo se estabilizando acima da referencia B.

Equacionando o problema na sua forma de energia, temos;

Ponto A: energia cinética $E = \frac{1}{2}MV^2$

M = massa (kg)

V = velocidade (m/s)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

m = comprimento (metro)

$$E = \frac{1}{2}MV^2 = kg \frac{m^2}{s^2} = \frac{kg \cdot m}{s^2}$$

$$\frac{kg \cdot m}{s^2} = N(\text{newton}) = \text{força}$$

$$E = N \cdot m = \text{Joule}$$

Desta forma, a energia incidente ou impactante na ponta do tubo de Pitot é uma forma de energia cuja unidade é o Joule. Essa mesma energia faz com que haja uma energia contraria no tubo equilibrando essa energia impactante. Sua denominação é dita ou chamada de energia potencial ou energia de pressão, também podendo ser representada em sua unidade dimensional por Joule.

Na fig. 1 temos em B o ponto de equilíbrio, onde existe a energia estagnada denominada energia potencial. Vejamos:

$E_B = \rho \cdot g \cdot H$ onde;

ρ = densidade (kg)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

H = altura (metro)

$$E_B = Kg \cdot m \cdot m/s^2 = \text{Joule}$$

Desta forma, podemos igualar os dois termos de equação $E_A = E_B$.

$$E = \frac{1}{2}MV^2 = \rho gH \quad \text{ou} \quad V^2 = \frac{2\rho gH}{M}$$

Em termos de unidade dimensional, posso cortar ρ (kg) com M(kg) então, a expressão fica;

$$V^2 = 2gH \quad \text{ou} \quad V = \sqrt{2gH}$$

Assim sendo, encontramos a correlação entre altura manométrica e velocidade fluídica. Como a altura H pode ser facilmente medida, podemos afirmar que a

Estudo do tubo de Pitot

velocidade é uma variável que depende somente da altura manométrica lida no tubo de Pitot. Por outro lado, podemos ainda aplicar a equação de Bernoulli nos pontos A e B da fig.1 que chegaremos à mesma solução encontrada acima. Vejamos:

Equação de Bernoulli

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} \quad ;$$

Como se trata de um canal, não existe pressão manométrica no ponto A, pois ele está muito próximo da superfície do canal. Logo $\frac{P_A}{\gamma} = 0$. Por outro lado, no ponto B não existe velocidade, logo $\frac{V_B^2}{2g} = 0$. A expressão fica;

$$\frac{V_A^2}{2g} = \frac{P_B}{\gamma}$$

Em termos de unidade dimensional ou grandeza, $\frac{V_A^2}{2g} = m$ (metro), assim como, $\frac{P_B}{\gamma} = m$ (metro).

O termo $\frac{V_A^2}{2g} =$ energia de velocidade equivalente em metro e, $\frac{P_B}{\gamma} =$ energia potencial equivalente em metro. Então, $\frac{V_A^2}{2g} = \frac{P_B}{\gamma}$ ou $V_A = \sqrt{2g \frac{P_B}{\gamma}}$

P_B = pressão no ponto B (m)

γ = peso específico da água kg/m³

Dimensional da equação:

$$V_A^2 = 2 \frac{m \frac{kg}{m^3}}{s^2 \frac{kg}{m^3}} = \frac{2 \cdot m \cdot kg \cdot m^3}{s^2 \cdot kg \cdot m^2} = \frac{2m \cdot m}{s^2} \quad \text{como} \quad g = \frac{m}{s^2} \therefore V_A = \sqrt{2 \cdot g \cdot m} = Vel$$

H, por ser altura manométrica (pressão), pode ser transformada em kg/m² (pressão), então como foi visto acima, $V_A^2 = 2m^2/s^2$ ou $V_A = \sqrt{2 \cdot g \cdot m}$ que é velocidade.

Concluindo, podemos dizer ou afirmar que os termos da equação de Bernoulli, na verdade, são formas de energia expressa por altura ou energia potencial.

Diante do exposto, perguntamos, existe a necessidade de levar esse tubo de Pitot primitivo para ser calibrado em Laboratório de vazão? Nota-se que a variável procurada é a velocidade, sendo ela, tanto na equação inicial, cuja forma ou unidade de energia é o Joule, quanto na equação de Bernoulli, cuja unidade ou forma de energia é a altura manométrica. Qualquer das duas equações nos leva a determinar a velocidade como uma função da altura ou diferencial de pressão frente à pressão atmosférica caracterizada pelo ponto B.

Estudo do tubo de Pitot

Finalizando essa introdução inicial, definimos que a velocidade pode ser traduzida ou correlacionada de maneira exata por uma simples grandeza, mensurável que é a altura manométrica ou normalmente denominada pressão diferencial (ΔP).

Ate agora, tratamos da medição da velocidade fluídica, frente a um canal que escoava livremente por caimento gravitacional. Transportando esse mesmo tubo de Pitot primitivo para uma rede com escoamento forçado ou pressurizado, conforme fig. 2 teremos.

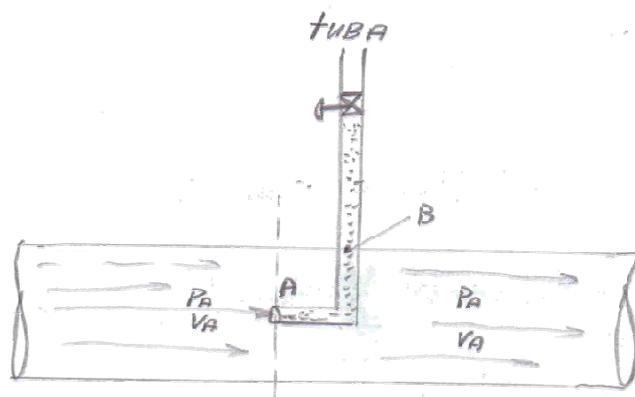


Fig. 2

Na figura 2, vemos o tubo de Pitot primitivo, agora denominado tubo A, inserido na tubulação com sua ponta ou “Tip”, frontal ao escoamento V_A . No tubo, se instalássemos um medidor de pressão, aparecerá a pressão P_A mais um ΔP_A causado pela velocidade impactante na ponta do tubo de Pitot. Para neutralizarmos a pressão P_A , inserimos um outro tubo, semelhante ao tubo A, agora denominado tubo B, porém, com sua ponta ou “Tip” no sentido do escoamento, conforme ilustra a fig. 3.

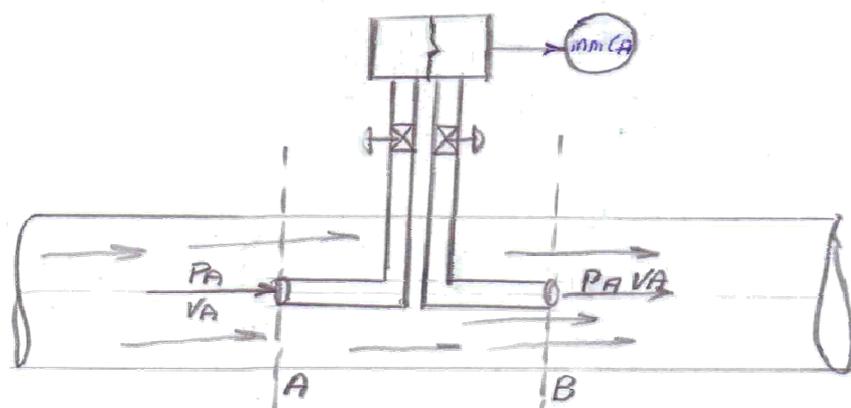


Fig. 3

No tubo B, aparecerá a pressão P_A do fluido, porém, sem o acréscimo da pressão ΔP_A decorrente da velocidade impactante no tubo A. Equacionando essa nova situação na sua forma ou condição mais simples temos;

P_A do lado a montante é igual a P_A do lado a jusante, portanto, como essas duas pressões são iguais e, estando em oposição dentro de uma célula ou câmara de pressão diferencial, a resultante é zero. Por outro lado, o vetor velocidade V_A refletirá sua energia impactante no lado positivo da célula, causando nela um pequeno desequilíbrio que se transformará em um sinal eletrônico.

Estudo do tubo de Pitot

Tudo seria perfeito se não ocorresse uma sucção do lado à jusante quando V_A desliza sobre o Tip do lado B. Tal deslizamento aumenta ou diminui a sucção em função da velocidade V_A . Se esse deslizamento não causasse a sucção mencionada, a transformação $V_A = \sqrt{2gH}$ seria perfeita, sem qualquer necessidade de correção ou de se agregar a formula de velocidade a constante K_{pc} que é denominada Fator de Descarga do tubo de Pitot. Particularmente, esse fator vale exatamente 0,865 quando a velocidade de escoamento no sistema de medição for igual a 2 m/s. Assim teremos;

$$\Delta P_T = P_A + \Delta P_A - (P_A - \Delta P_B) = \Delta P_A + \Delta P_B$$

ΔP_T = Pressão diferencial total

ΔP_A = Pressão causada pelo impacto de V_A no Tip A

ΔP_B = Pressão causada pelo deslizamento de V_A sobre o Tip B

Compreende-se então que o valor de ΔP_B varia com a velocidade, agregando seu valor a pressão diferencial primaria, contribuindo de forma significativa para o aumento da vazão real. Com a introdução na formula do fator de descarga do tubo de Pitot, pode-se corrigir o acréscimo indesejado, ocorrido pelo deslizamento de V_A sobre o Tip, lado negativo ou a jusante. Esse fator de descarga, denominado K_{pc} vale 0,865, valor default, para uma velocidade de 2,0 m/s. Como exemplo podemos citar que, para $V_A = 0$ $K_{pc} = 1$ assim como, $V_A = 2\text{m/s}$ $K_{pc} = 0,865$.

$$V_A = 1 \text{ m/s } K_{pc} = 0,876 \text{ e, } V_A = 3 \text{ m/s } K_{pc} = 0,852$$

Todo trabalho de medição executado com o tubo de Pitot Cole, apresentará erro na vazão medida numa rede de distribuição se o fator de descarga K_{pc} não for corrigido em decorrência de variações de V_A . Como exemplo prático, podemos mencionar e mensurar que com uma variação de 1 m/s tanto para cima quanto para baixo em relação ao centro ou default do tubo de Pitot Cole, cujo coeficiente de descarga vale 0,865, o erro nesse caso particular será de +/- 1,4% da vazão. Aqui esta a razão do tubo de Pitot, assim como os demais elementos primários deprimogêneos serem ditos ter como rangeabilidade o índice de 3,0 a 3,5 para 1.

A Lamon desenvolveu a correção automática para esse fator através de uma equação matemática implantada dentro do microprocessador da Maleta de Medição, assim como dentro do programa MDHIDRO, com sigla registrada de Fcl (Fator de Correção Lamon), cuja função é a correção automática desse Fator em função do ΔP_T medido. Assim sendo, conseguimos estender a rangeabilidade do tubo de Pitot de 3:1 para 35:1, ou seja, agora podemos medir uma vazão variável, sem a introdução de erro nas medições desde velocidades de 3,5 m/s ate 0,1 m/s.

Estudo do tubo de Pitot

CALIBRAÇÃO DO TUBO DE PITOT COLE.

Calibrar um tubo de Pitot Cole em bancada de teste de Laboratório é perda de tempo ou jogar dinheiro fora, principalmente quando se usa como meio de calibração o Ar e, através de calculo transformar os valores obtidos na medição com ar para valores equivalentes ao da água. Existe um ditado no meio técnico acadêmico que diz:

“Quando se pode medir, não calcule e quando se pode calcular não estime.”

Para exemplificar que o tubo de Pitot não necessita calibração, basta analisar as equações matemáticas de transformação de energia, seja ela de energia cinética ou energia potencial conforme ilustrado nas paginas iniciais desse trabalho. O Tubo de Pitot é por si um elemento primário de vazão auto calibrado, necessitando apenas por parte do técnico operador, quando de sua utilização, verificar o alinhamento e geometria dos Tips. Na duvida, investigar o seu alinhamento dinâmico dentro da tubulação, girando-o 180 graus a fim de confirmar se a pressão diferencial esta equilibrada, ou seja, o mesmo valor positivo da pressão diferencial deverá ser igual ao do valor negativo.

Reforçando a tese da não necessidade de calibração do tubo de Pitot Cole em Laboratório, vamos mencionar dois trabalhos práticos de levantamento de teste com o tubo de Pitot realizado em Laboratório. O primeiro trata-se da investigação de 13 certificados de teste de calibração do tubo de Pitot Cole. Foi levantada uma curva da media dos valores obtidos dos lados A e lado B dos 13 certificados. Em seguida levantou-se o desvio padrão de cada um dos lados em relação a media. Notou-se que o desvio máximo encontrado foi de 0,005 de um deles em relação a media. Particularmente, esse desvio equivale a um erro de 0,5%. Supomos que o desvio apresentado ocorreu mais pelo arredondamento de calculo de transformação das medições com ar para água, do que propriamente erro do tubo de Pitot Cole. Todavia, o erro encontrado estava dentro do esperado.

A partir dessa analise, persuadimos você a pensar, ora, se 13 Certificados analisados estavam dentro do resultado esperado, estatisticamente essa amostragem é o bastante para confirmar o universo dos demais tubos de Pitot Cole industrializados. Daí, perguntamos, existe a real necessidade de Calibração ou certificação?

O segundo exemplo trata-se de uma nova experiência pratica de Laboratório com o tubo de Pitot na qual os furos dos Tips foram modificados a fim de se investigar a interdependência ou não dos diâmetros do furo em relação ao ΔP gerado pelo impacto do vetor velocidade V na ponta do Tip. Sabemos que toda vazão do fluido água é turbulento a partir da velocidade de $\pm 0,055$ m/s o que equivale a um numero de Reynolds de aproximadamente 4000 e, por ser turbulento, seu perfil de velocidade é característico, tendendo a ser retilíneo quando próximo do centro. Estando o Tip frontal ao vetor velocidade impactando em seu furo, teoricamente, basta que um único vetor velocidade V , das centenas que atinge a ponta do Tip para que haja a transformação de energia de velocidade em energia de pressão. Com esse raciocínio, tomamos um tubo de Pitot Cole normal, cujo Tip tem os furos iguais e

Estudo do tubo de Pitot

calibrados de 3 mm de diâmetro de cada lado. Inserimos o tubo de Pitot na tubulação com água em circulação. Acionamos a Bomba com uma rotação equivalente a 50 Hz, medindo a vazão através de um medidor magnético instalado com a unidade de vazão em litros/segundo. Fez-se a medição do ΔP com uma Maleta eletrônica que indicou e registrou o valor de 193 mmCA. Simultaneamente, a velocidade calculada foi indicada na própria maleta, estando a 1,70 m/s.

Variou-se o diâmetro do Tip a montante, lado A e, a jusante, lado B para 1,5 mm. Nas mesmas condições de velocidade e vazão, obtivemos os mesmos valores de ΔP e velocidade calculada pela maleta. Variou-se novamente o furo do Tip para 5 mm, dando-lhe o formato de uma boca de sino ou funil. Os resultados foram os mesmos. Não satisfeito novamente variamos as condições dos Tips, desta vez, alteramos o Tip a montante para 1,5 mm e o Tip a jusante permaneceu com 5 mm.

Com as mesmas condições de rotação da bomba e da vazão, obtivemos os mesmos resultados da medição do ΔP e da velocidade registrada pela Maleta.

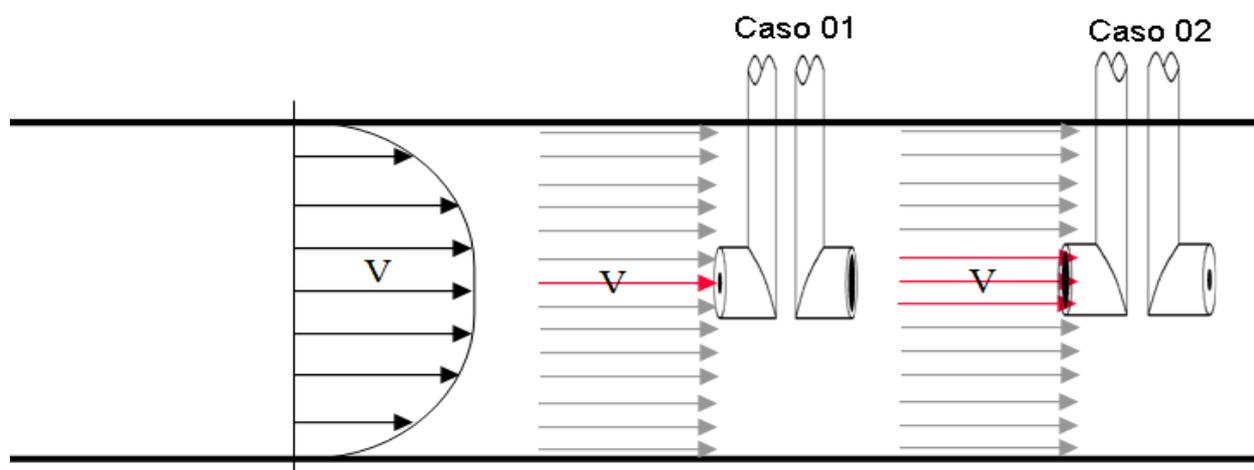
Assim sendo, podemos concluir que a condição do furo do Tip ou um leve amassado em qualquer um deles, não interfere na conversão de energia de velocidade para energia de pressão. Observamos também que, com pequeno ângulo +/- 4 a 6 graus, entre o alinhamento do tubo de Pitot com a linha de centro da tubulação não interfere significativamente no ΔP gerado. Esse fato é facilmente demonstrado pela matemática trigonométrica.

RESULTADO DO TESTE.

- 1) Bomba girando com frequência de 50,0 Hz
Vazão indicada pelo magnético 4,90 l/s
Pitot com Tip normal, a montante e a jusante com 3 mm de diâmetro.
 ΔP medido = 193 mmCA
Velocidade medida = 1,70 m/s
- 2) Idem
Pitot com Tip a montante e a jusante com 1,5 mm de diâmetro
 ΔP medido = 192 mmCA
Velocidade medida = 1,69 m/s
- 3) Idem
Pitot com Tip a montante de 1,5 mm e Tip a jusante de 5 mm
 ΔP medido = 193 mmCA
Velocidade medida = 1,70 m/s
- 4) Idem
Pitot com Tip montante e a jusante de 5 mm
 ΔP medido = 193 mmCA
Velocidade medida = 1,70 m/s

Estudo do tubo de Pitot

INDEPENDENCIA DA AREA DO FURO DO TIP



$$P = \frac{F}{A} \quad P = \frac{V \cdot A}{A} \quad P = k \cdot V$$

Como velocidade fluídica é uma forma de energia, podemos supor nesse caso particular que,

$F=V$, então $P=F/A = V/A$.

No primeiro caso, **caso 01**, supondo que a área do Tip tende para zero de modo que apenas um único vetor V atinja ou impacta na sua de área, $A=0,001$ unidade, teremos $P=1V/0,001$ que é igual a 1000 unidades.

No **caso 2**, aumentamos a área para $A=1$ unidade. Proporcionalmente, teremos 1000 vetores V atingindo ou impactando o Tip. Assim sendo, $P=1000/1= 1000$ unidades. Dai, pode-se dizer ou afirmar que a transformação da velocidade em pressão no Tip independe de sua área.

O diferencial gerado pelo tubo de Pitot independe da área do furo do tip. Desta forma seja a área do tip ou seu diâmetro de 0.5, 1.0, 3.0 ou 5.0 mm, ele transformará a velocidade da rede, em seu equivalente diferencial de pressão. Vejamos um exemplo prático; Um reservatório com 20 metros de altura e 10 metros de raio. A pressão na base do reservatório é exatamente 20 mCA ou 2 kg de pressão por unidade de área. Agora vejamos um tubinho de vidro com a mesma altura, 20 metros, porém, com 1 milímetro de diâmetro interno. Ele terá a mesma pressão na sua base, ou seja, 20 mCA ou 2 kg de pressão por unidade de área.

Finalizado e considerando o que expomos e demonstramos nesse trabalho investigativo novamente perguntamos: Há a necessidade de Calibração do Tubo de Pitot Cole em Laboratório de Calibração e Certificação? Como calibrar não prejudica, assim, a decisão de perder tempo e dinheiro é vosso!

P.S - Atendendo observação de um Técnico qualificado de uma Empresa parceira, o qual após ler com muita atenção o nosso trabalho, questionou sobre a possibilidade da investigação dos resultados com o TIP bem amassado uma vez que afirmávamos,

Estudo do tubo de Pitot

baseado na teoria vetorial que um leve amassado ou deformação não inviabilizava a performance do tubo de Pitot Cole como agente ou elemento primário de vazão.

Agora, vamos além declarando que ate mesmo um forte amassado em qualquer dos TIP não compromete o seu uso. Assim sendo, comprovamos tal afirmação, realizando na prática, em nossa mesa de teste de vazão e de treinamento o experimento em questão.

Amassamos o TIP conforme ilustra a foto anexa.



Conclusão

Realizamos o experimento nas mesmas condições anteriores. Sem qualquer surpresa de nossa parte, obtivemos os mesmos resultados, ou seja, Bomba a 50 Hz Vazão indicada pelo magnético 4,90 l/s dP gerado e registrado pela maleta 193 mmCA. Giramos o tubo de Pitot 180 graus onde o TIP amassado passou para a posição a jusante. O valor do dP gerado mostrou-se o mesmo, porem, com o seu valor negativo.

Assim sendo, podemos mais do que nunca afirmar de maneira insofismável que calibrar tubo de Pitot Cole em Laboratório de Calibração é perda de tempo assim como, dinheiro do cofre das Empresas que vai para o ralo, da mesma forma que os vazamentos sem controle.

Artigo desenvolvido p/ Eng. G. Lamon Outubro 2009

Revisado e editado em fevereiro de 2013