

## XII-022 - INSTRUMENTO SIMPLES E ROBUSTO PARA A MEDIÇÃO DE VAZÃO

**Natally Annunciato Siqueira<sup>(1)</sup>**

Mestranda do programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade de São Paulo. Engenheira Ambiental e Urbana pela Universidade Federal do ABC. Supervisora na Divisão de Operação de Água da Sabesp.

**Podalyro Amaral de Souza<sup>(2)</sup>**

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo. Professor Sênior do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Paramu, 716 – Vila Bela – São Paulo - SP - CEP: 03147-100 - País - Tel: +55 (11) 2347-8601 - e-mail: [nannunciato@sabesp.com.br](mailto:nannunciato@sabesp.com.br).

### RESUMO

Em sistemas públicos de distribuição de água, a medição de vazão é essencial para o controle e gestão das etapas do processo. No mercado, encontram-se disponíveis diversos tipos de equipamentos com diferentes princípios de operação, o tubo Pitot Cole mede a velocidade que é obtida pelo diferencial de pressão em duas tomadas opostas. Sua criação iniciou-se com Henri Pitot em 1732, sendo aperfeiçoada por Edward Cole em 1896, dando origem ao equipamento que conhecemos hoje. Com o intuito em melhorar a medição de vazão, mantendo suas vantagens como baixo custo e fácil instalação, este trabalho apresenta um medidor de vazão com configuração prismática hexagonal.

**PALAVRAS-CHAVE:** Medição de Vazão, Tubo Pitot, Medição de Velocidade.

### INTRODUÇÃO

A preocupação em aperfeiçoar e desenvolver métodos com o intuito de medir vazão é fundamental para o acompanhamento e monitoramento de processos que envolvam fluidos como a água considerando a diminuição da disponibilidade deste recurso e sua importância para a manutenção da vida.

Exemplificando, em sistemas públicos de abastecimento de água é necessário gerenciar todas as entradas e saídas de água viabilizando o melhor conhecimento do processo e tomadas de decisões assertivas visando tornar o sistema mais eficiente. No Brasil, estima-se que no processo de distribuição de água, as perdas estejam na ordem de 36,7%, enquanto em países com sistemas mais eficientes, as perdas não ultrapassam 10% (SNIS, 2014).

No mercado, encontram-se disponíveis grandes quantidades de equipamentos que medem vazão com princípios de operação diferentes. Para o tubo Pitot Cole, a vazão no equipamento é determinada indiretamente. Primeiro determina-se a velocidade através de leituras de diferencial de pressão entre duas tomadas opostas e através de equacionamentos obtém-se a vazão. Desta forma, as leis envolvidas na medição de vazão com o equipamento envolvem a aplicação da equação de Bernoulli que associa o diferencial de pressão imposto pelo equipamento à velocidade do fluido, e a equação da continuidade que associa a velocidade à vazão.

Ainda que idealizado em 1896, o tubo Pitot Cole é um instrumento amplamente utilizado devido às vantagens de aplicação como instalação em carga, baixo custo e facilidade no transporte.

O método de determinação da vazão tem uma precisão na ordem de  $\pm 2\%$ . No entanto, relatos indicam que a precisão do equipamento pode ser minimizada por problemas em suas tomadas de pressão devido falhas na fabricação e decorrentes do uso do equipamento. Ainda, no processo de medição de vazão podem acontecer acidentes que envolvem a colisão das tomadas de pressão com a parede interna da tubulação ocasionado sua quebra, deformação ou desalinhamento (PEDRAZZI, 1992).

## OBJETIVOS

Propor a medição de vazão com um equipamento cujo princípio de operação seja semelhante ao tubo Pitot Cole, onde as tomadas de pressão posicionem-se em um tubo prismático hexagonal. Esta configuração visa inserir maior robustez para o equipamento, projeto de simples execução, e obtenção de maior confiabilidade nas medições.

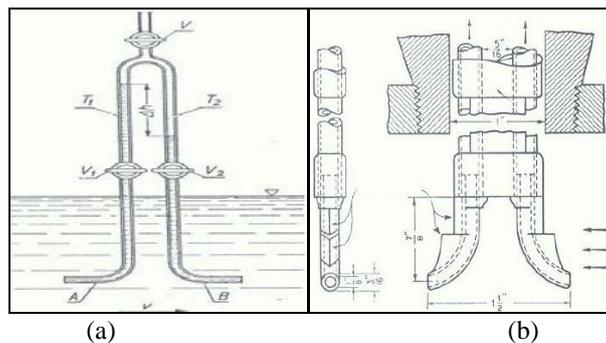
## ORIGEM DO TUBO PITOT COLE

Em novembro de 1732, o francês Henri Pitot, membro da Academia Real de Ciências em Paris, publicou um trabalho inovador: *Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux*, que detalhou um instrumento capaz de medir a velocidade de um fluido, denominado tubo Pitot.

Apesar da relevância da invenção, a falta de especificações embasadas em teorias consolidadas fez com que fossem construídos muitos equipamentos com formatos variados, que mediam velocidades incoerentes, diminuindo sua credibilidade.

Em 1858, Henri Darcy, também francês, implantou melhorias no equipamento que permitiram maior precisão nas leituras assim como leituras de velocidades mais baixas. Elas incluíram instalação de válvulas para leituras externas ao fluido de medição e que permitiram que a pressão interna no manômetro fosse diferente da atmosférica, redução no diâmetro dos tubos de tomada de pressão reduzindo oscilações na coluna d'água e melhorou a hidrodinâmica do instrumento utilizando tubos de cobres achatados em vez de tubos de vidro.

E em 1896, Edward Cole apresentou modificações no equipamento que permitiram a instalação em tubulações sobre pressão, mesmo que em carga, dando origem ao tubo Pitot Cole. A Figura 1 ilustra as modificações realizadas por Henri Darcy e por Edward Cole.



**Figura 1** - (a) Tubo de Pitot modificado por Darcy. (b) Tubo de Pitot modificado por Edward Cole.  
Fonte: Troskolanski, 1960 *apud* MARTIM, 2005; Bean, 1971 *apud* MARTIM, 2005.

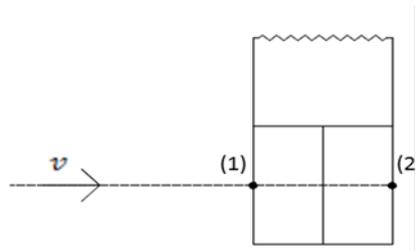
## GRANDEZAS ENVOLVIDAS

Apresentam-se as grandezas envolvidas para o desenvolvimento do equacionamento do medidor de vazão proposto.

Notação	Grandeza	Unidade
$h_1, h_2$	Altura na tomada de pressão 1, 2	m
$p$	Pressão	mca
$\rho$	Massa específica	kg/m <sup>3</sup>
$v$	Velocidade	m/s
$g$	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
$k$	Coefficiente de ajuste	-
$\Delta h$	Diferencial de pressão	M
$Q$	Vazão	m <sup>3</sup> /s
$A$	Seção líquida transversal, seção molhada	m <sup>2</sup>
$d$	Diâmetro	M
$Re$	Número de Reynolds	-
$C_v$	Coefficiente de velocidade	-

### EQUACIONAMENTO ENVOLVIDO

Frente à proposta do medidor de vazão com tomadas de pressão em faces opostas de um tubo prismático hexagonal, esquematizado na Figura 2, apresenta-se o modelo desenvolvido para a determinação da velocidade.



**Figura 2** - Esquema das tomadas de pressão do protótipo.

Primeiramente aplica-se a Bernoulli a ambos os pontos de tomada de pressão (1) e (2) separadamente:

$$h_1 = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z_1 \quad (\text{Equação 1})$$

$$h_2 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z_2 \quad (\text{Equação 2})$$

Desenvolvendo-se as equações e aplicando Bernoulli entre os pontos de tomada de pressão (1) e (2), obtém-se a equação da velocidade para o protótipo:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1+k}} \sqrt{2g\Delta h} \quad (\text{Equação 3})$$

No caso do Tubo Pitot Clássico, a equação da velocidade é:

$$v = \sqrt{2g\Delta h} \quad (\text{Equação 4})$$

Chama-se a atenção para o coeficiente de correção ( $k$ ) imposto pelo protótipo, e que é ausente para o Tubo Pitot Clássico, possibilitando medições de velocidades mais baixas já que impõe aumento na leitura do diferencial de pressão.

## O PROTÓTIPO

O protótipo do medidor de vazão foi construído a partir de um tubo de alumínio inserindo-se em sua ponta um tubo sextavado com diâmetro de 24 mm. O equipamento foi projetado em sua totalidade com diâmetro inferior à 25,4 mm, diâmetro usual para registros de dreivação - TAPs, o que viabiliza a inserção através destes.

As tomadas de pressão foram posicionadas em faces opostas, acopladas separadamente à duas mangueiras de nylon de 2 mm que passam internamente ao tubo, seguindo até a extremidade superior. A Figura 3 ilustra o protótipo construído.



Figura 3 - Protótipo construído e detalhe de uma das faces com a tomada de pressão.

## ENSAIO DE CALIBRAÇÃO

Com o objetivo de determinar o coeficiente de velocidade do protótipo, o ensaio de calibração foi realizado no Centro Tecnológico de Hidráulica - CTH (Convênio USO-DAEE) em uma bancada construída com um canal circular de seção transversal retangular. Em seu eixo encontra-se fixada uma haste giratória conectada a um motor controlado por inversor de frequência, o qual permite o controle da velocidade angular. Em uma das extremidades da haste giratória foi instalado o equipamento, de forma que as faces com as tomadas de pressão ficaram imersas na água com profundidade fixa e alinhadas à trajetória circular.

A velocidade tangencial foi determinada pela relação entre o espaço percorrido e o tempo gasto medido por meio de um cronômetro digital. Para a leitura do diferencial de pressão, foi utilizado um manômetro em forma de U invertido, também fixado na parte superior da haste giratória.

Com a realização dos ensaios, pode-se determinar o coeficiente de velocidade igual 0,794, de modo que a lei de aferição obtida foi:

$$v = 0,794 \sqrt{2g\Delta h} \quad (\text{Equação 5})$$

## A CONFIGURAÇÃO HEXAGONAL

A elaboração do medidor de vazão com tomadas de pressão inseridas em faces opostas de um hexágono apresenta vantagens em relação ao Pitot Cole o que permitem melhorias na determinação da vazão. Destacam-se:

- Facilidade de introdução na tubulação devido ao formato geométrico. Como as tomadas de pressão estão posicionadas em faces opostas do prisma hexagonal, e este possui diâmetro inferior ao do TAP, o equipamento pode ser inserido de facilmente na tubulação.
- Robustez do equipamento. O equipamento não possui partes móveis evitando que ocorram deformações com o uso ou que este quebre-se facilmente. Também, devido à geometria simples, a confecção de réplicas do equipamentos sem variações na sua forma final é facilmente mantida, o que não ocorre no tubo Pitot Cole em função da não conformidade de seus TIPS.
- Descolamento da camada limite garantido no mesmo local. Dada a geometria simples, a formação da esteira é estável, mesmo com a variação do número de Reynolds.

No ensaio de calibração, relacionou-se o coeficiente de velocidade em função do número de Reynolds expresso pelo diâmetro circunscrito ao prisma do protótipo,  $d$ , e da velocidade teórica  $\sqrt{2g\Delta h}$ , equação 6.

$$Re = \frac{d\sqrt{2g\Delta h}}{\nu} \quad (\text{Equação 6})$$

O resultado apresentou valores estáveis para o coeficiente de velocidade notadamente para  $Re > 33.000$ , onde a amplitude do coeficiente de velocidade foi de 0,007.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A execução de um medidor de vazão com geometria prismática hexagonal e tomadas de pressão em faces opostas permite a confecção do equipamento com maior facilidade, o tornam mais robusto evitando falhas durante a operação e permitem maior confiabilidade na determinação da vazão.

## AGRADECIMENTOS

À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp, ao Centro Tecnológico de Hidráulica – CTH e à Universidade de São Paulo – USP pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NADER, G.; JABARDO, P. J. S.; TAIRA, N. M. Avaliação dos coeficientes de calibração de tubos de Pitot Cole com tips modificados. Congresso Internacional de Metrologia Mecânica, CIMMEC, 2, 2011, Natal.
2. MARTIM, A. L. Avaliação do desempenho de um medidor de vazão eletromagnético em situações práticas reais de instalação. Campinas: UNICAMP, 2005. 199p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
3. PEDRAZZI, J. A. Critérios de projeto para um novo tip do Pitot-Cole. São Paulo: USP, 1992. 132p. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, São Paulo, 1992.
4. SNIS - Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Esgotos. 2014. Disponível: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2014>>. Acesso em: 03 de janeiro de 2017.
5. TAIRA, N.M. Treinamento em macromedição, conceitos e termos básicos da medição de vazão de fluidos. São Paulo: IPT, 2003. (Apostila IPT – Convênio IPT / Sabesp).