

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MUDANÇA DE ÂNGULOS DE *ROLL* E *YAW* DE TUBO PITOT COLE NA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO

*Gilder Nader*¹, *Olga Satomi Yoshida*², *Nilson Massami Taira*³

¹ Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, Brazil, gnader@ipt.br

² Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, Brazil, olga@ipt.br

³ Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, Brazil, nmtaira@ipt.br

Resumo: O objetivo desse trabalho foi verificar a influência da alteração dos ângulos de *roll* e *yaw* do tubo de Pitot Cole na medição da velocidade de um fluido e avaliar qual a tolerância máxima dessas inclinações dentro de parâmetros de incerteza. Essa é uma informação importante para empresas de saneamento básico que utilizam tubo de Pitot Cole para mapeamento de velocidades de água em tubulações para determinação de vazão. Pois, em muitos casos, por dificuldades de montagem, o tubo de Pitot não fica perfeitamente alinhado com a direção do escoamento, seja por razões de posicionamento, ou pela força que a água exerce no tubo de Pitot Cole, inclinando-o no sentido do escoamento. Para determinar as influências dos ângulos de *roll* e *yaw* nas medições realizadas com tubo de Pitot Cole, esse foi ensaiado no túnel de vento aerodinâmico do IPT. Os resultados mostraram que até 7° de *yaw* e 3° de *roll* há uma variação de até 1 % no valor lido.

Palavras-chave: Tubo Pitot Cole, Túnel de Vento Aerodinâmico; Calibração.

1. INTRODUÇÃO

Tubos de Pitot Cole, ver Figura 1, são instrumentos amplamente utilizados em medição de vazão de água em dutos de empresas de saneamento básico e também tem grande aplicação em medição de vazão de gases, como por exemplo, de biogás, com finalidade a calibração em campo dos medidores mássico-térmicos [1]. As medições de vazão, utilizando a técnica de pitometria, são realizadas por meio de mapeamento de velocidade do fluido, conforme recomendações contidas na norma ISO 3966:2008 [2].

Uma grande vantagem da técnica de pitometria para medição de vazão é a ampla faixa de diâmetros de dutos que podem ser mapeados, como por exemplo, desde 300 mm até 3000 mm. Para realizar essas medições, basta a instalação de *taps* nos dutos, caso eles não possuam.

No entanto, há preocupações de equipes de pitometria quanto à confiabilidade das medições, levando-se em conta o fato delas serem realizadas em condutos fechados, não havendo, portanto, como observar possíveis inclinações do tubo de Pitot Cole. As inclinações que podem ocorrer, são basicamente: os *tips* (tubos de detecção da pressão dinâmica do escoamento) do tubo de Pitot Cole (Figura 1) perderem o alinhamento com a direção do escoamento, inclinando-se em

torno do seu eixo *x* (*roll*), ver Figura 2; e o tubo de Pitot Cole se inclinar em relação ao eixo do duto (*yaw*) onde está instalado (eixo do tubo de Pitot Cole, como mostrado na Figura 2), devido à ação da força de arrasto do fluido.

Dessa forma, neste artigo são analisadas as tolerâncias dessas duas inclinações na medição de vazão em condutos fechados utilizando a técnica de pitometria.

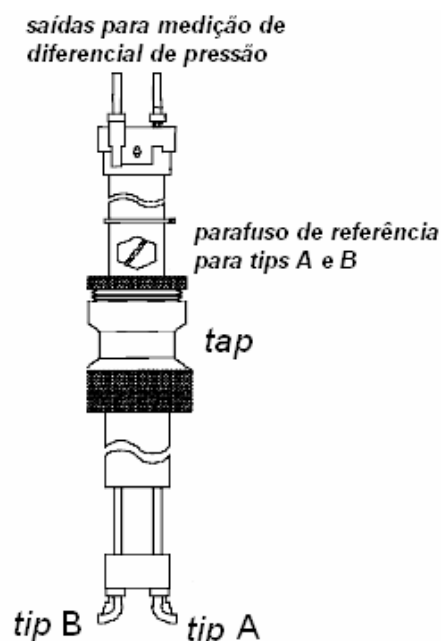


Fig. 1. Principais características de um tubo de Pitot Cole

2. METODOLOGIA

2.1 Arranjo para calibração em túnel de vento

As calibrações do tubo de Pitot Cole foram realizadas no túnel de vento aerodinâmico do IPT, ilustrado na Figura 3a, que é acreditado na RBC[3], possui seção de testes aberta de 500 mm x 500 mm, faixa de calibração entre 0,2 m/s até 45 m/s[3], perfil de velocidades uniforme e intensidade de turbulência menor que 0,4% [4]. Os instrumentos em calibração, neste caso o tubo de Pitot Cole, são instalados na descarga do túnel de vento, como mostrado na Figura 3b,

assim como o padrão de velocidades utilizado, que neste ensaio foi um tubo de Pitot estático.

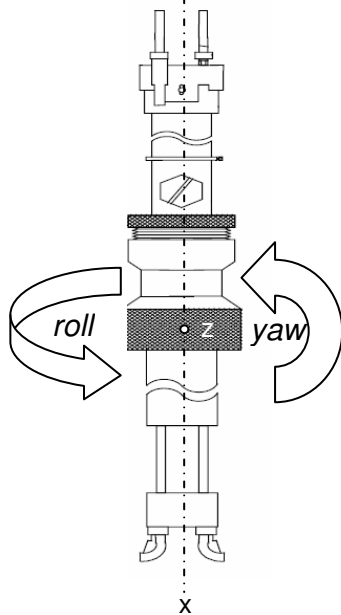
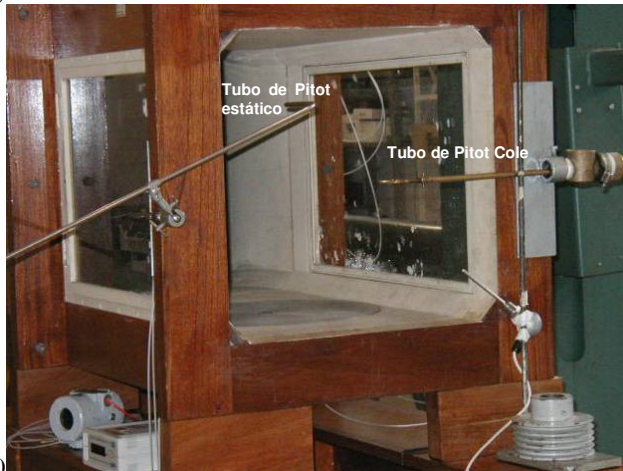


Fig. 2. Ilustração das inclinações roll, em torno do eixo x, e yaw, em torno do eixo z



a)



b)

Fig.3. a) túnel de vento aerodinâmico do IPT, utilizado para calibração de sensores de velocidade de fluidos, e b) detalhe do tubo de Pitot estático (padrão) e do tubo de Pitot Cole instalados na descarga do túnel de vento

Trabalhos anteriores [5] realizados pelo IPT mostraram que as calibrações dos tubos de Pitot Cole podem ser realizadas em túnel de vento aerodinâmico e os resultados transformados, por similaridade de Reynolds, para velocidade da água.

Como o tubo de Pitot Cole é na maioria das vezes utilizado para medição de vazão de água, há necessidade de realizar a transformação dos valores de velocidade do escoamento em ar para água. Para isso é utilizada a semelhança de Reynolds (Re):

$$Re = \rho \cdot u \cdot L / \mu \quad (1)$$

onde ρ é a massa específica do fluido; u é a velocidade do fluido, L é o comprimento característico do tubo de Pitot Cole e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

O valor de Re e L são idênticos em ambos os fluidos (ar e água). Dessa forma, para determinar a relação entre as velocidades (u) foram considerados os valores abaixo, considerando a pressão atmosférica no nível do mar (101,325 kPa):

$$\rho_{\text{água}} = 998,204 \text{ kg/m}^3 \text{ – para água pura a } 20^\circ\text{C [6];}$$

$$\mu_{\text{água}} = 1,005 \times 10^{-3} \text{ Pa.s – para água pura a } 20^\circ\text{C [7];}$$

$$\rho_{\text{ar}} = 1,2 \text{ kg/m}^3 \text{ – para ar a } 20^\circ\text{C no nível no mar; [8]}$$

$$\mu_{\text{ar}} = 18,6 \times 10^{-6} \text{ Pa.s – para ar a } 20^\circ\text{C no nível no mar; [7]}$$

Dessa forma, chega-se que a relação entre as velocidades é:

$$u_{\text{ar}} = 15,40 u_{\text{água}} \quad (2)$$

2.2 Configurações ensaiadas

Para verificar a influência do ângulo de *roll* com a direção do escoamento, as calibrações foram realizadas alterando o ângulo entre -5° e $+5^\circ$ com passo de 1° . Essas medições foram realizadas para a velocidade do ar 10 m/s.

A verificação da influência da ângulo de *yaw* foi realizada para velocidades do ar entre 5 m/s e 35 m/s.

A velocidade verdadeira convencional foi medida com um tubo de Pitot estático (tubo Prandtl) conectado a um manômetro de coluna inclinada. Para cada ângulo de *yaw* do tubo de Pitot Cole, foi determinado o fator de correção da velocidade do ar, para que, independente da posição do Pitot Cole, fosse mantida a velocidade de referência.

Os ensaios foram realizados em com duas rampas de medição e os resultados obtidos são mostrados a seguir.

3. RESULTADOS

3.1. Influência do ângulo de roll

Na Figura 4 são mostrados os resultados das calibrações realizadas alterando o ângulo de *roll* entre -5° e $+5^\circ$. No eixo das abscissas são mostrados os valores dos ângulos de *roll* e no eixo das ordenadas os valores da variação da velocidade (u) em porcentagem. Há quatro curvas mostradas na Figura 4, que corresponde a duas rampas de calibração do *tip A* e duas rampas de calibração do *tip B* do tubo de Pitot Cole.

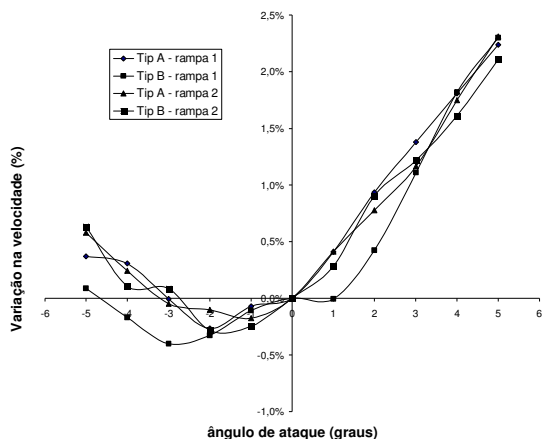


Fig. 4. Influência do ângulo de roll

Os resultados obtidos nesse ensaio apresentam incerteza expandida de 1,46 % para o *tip A* e 1,14 % para o *tip B* e estão baseadas na incerteza padrão combinada, multiplicadas por um fator de abrangência $k = 2$, considerando uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95 %.

Os resultados apresentados possuem simetria quanto à forma. No entanto, foi observado, tanto para o *tip A* quanto o *tip B*, que para ângulos de *roll* negativos, a variação na leitura da velocidade ficou em no máximo + 0,5%, enquanto para ângulos de *roll* positivos, a variação foi de até + 2,5%.

Considerando que as incertezas padrão dessas calibrações foi de 0,73% para o *tip A* e 0,57 % para o *tip B*, nota-se que entre os ângulos de *roll* -5° e $+2^\circ$ o erro da medição é em média inferior a 0,7 %, que está dentro da faixa da incerteza padrão da calibração.

3.2. Influência do ângulo de yaw

Na Figura 5 são mostrados os resultados da análise da variação da velocidade em função do ângulo que o tubo de Pitot Cole faz com o eixo do duto onde está instalado. Esta análise foi realizada entre 5 m/s e 35 m/s em ar, correspondente em água a velocidades entre 0,32 m/s e 2,30 m/s. Na Tabela 1 são mostrados os valores das velocidades do ar (v_{ar}), da velocidade equivalente em água ($v_{\acute{a}gua}$) e da incerteza expandida (U) [9] na condições do ângulo de *yaw* em 0° . Para os outros ângulos de *yaw*, a incerteza expandida obtida ficou na mesma faixa.

As incertezas expandidas relatadas estão baseadas em suas respectivas incertezas padrão combinadas, multiplicadas por um fator de abrangência $k = 2$, considerando uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95 %.

De modo similar à análise da influência do ângulo de *roll*, verifica-se pela Tabela 1 que a incerteza padrão para a velocidade 5 m/s é de 0,85%, e obtém-se até 6° de *yaw* um desvio inferior a 0,85%. Para velocidades superiores a 9,62 m/s, a incerteza padrão máxima é 0,575% e nota-se que até 6° de *yaw* o desvio máximo também é inferior à incerteza padrão máxima.

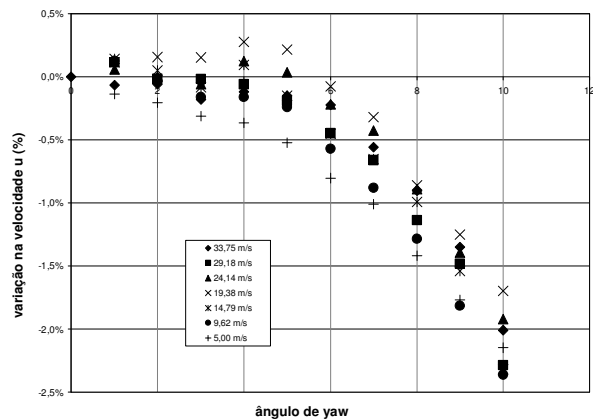


Fig. 5. Influência do ângulo de yaw do Pitot Cole

Tabela 1. Valores das velocidades do ar (v_{ar}), da equivalente em água ($v_{\acute{a}gua}$) e da incerteza expandida (U) na condição do ângulo de *yaw* 0°

v_{ar} (m/s)	$v_{\acute{a}gua}$ (m/s)	U (%)
5,00	0,32	1,69
9,62	0,62	1,15
14,79	0,96	1,05
19,38	1,26	1,03
24,14	1,57	1,02
29,18	1,89	1,01
33,75	2,19	1,01

3. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram analisadas as influências dos ângulos de *roll* e *yaw*, de um tubo de Pitot Cole, em medições de velocidade de fluidos. Utilizando como parâmetro de comparação a incerteza padrão das calibrações em laboratório, foi verificado que para ângulos de *roll* entre -5° e $+2^\circ$ o erro da medição é em média inferior à incerteza padrão obtida (0,73 %), e para a análise do ângulo de *yaw*, utilizando o mesmo parâmetro, foi verificado que até 6° os erros medidos são inferiores às incertezas padrão para cada velocidade da calibração.

Esses resultados ainda não abrangem todas as possibilidades de posicionamento em campo, e estes serão objetos de análise em trabalhos futuros, como por exemplo, verificar a influência da variação simultânea dos ângulos de *roll* e *yaw*. Realizar medições da variação da velocidade em função do ângulo de ataque para velocidades de 2 m/s até 35 m/s.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Sr. Josiel Alves que realizou todas as medições apresentadas nesse trabalho.

REFERENCIAS

- [1] G. Nader, P.T. Fracasso, E.S. Nóbrega, R. Gomes, M. Nunes, A.L. Pacifico, N.M. Taira, *Calibração de medidores de vazão de biogás com finalidade à venda de créditos de carbono*, I CIMMEC, Rio de Janeiro, outubro, 2008 .

- [2] ISO 3966:2008, *Measurement of fluid flow in closed conduits - Velocity area method using Pitot static tubes*.
- [3] http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/detalhe_laboratorio.asp?num_certificado=162&area=VAZ%C3O. (acessado em 08.07.2011)
- [4] G. Nader, C. dos Santos, P.J.S. Jabardo, M. Cardoso, N.M. Taira, M.T. Pereira, *Characterization of low turbulence wind tunnel*, IMEKO XVIII, Rio de Janeiro, outubro, 2006.
- [5] J. G. Sanchez, G. do Espírito Santo, *Alternative method for calibration of Cole type Pitot tube*, Flomeko 98, Suécia, junho, 1998.
- [6] G. S. Kell, *Density, Thermal Expansivity and Compressibility of Liquid Water from 0 °C to 150 °C: Correlations and tables for atmospheric Pressure and saturation Reviewed and Expressed on 1968 Temperature Scale*, Journal of Chemical and Engineering Data, Vol 20, No 1, 1975.
- [7] D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, 2004, p. 6-201
- [8] ANSI/ASHRAE 41.6, *Method for measurement of moist air properties*, 1994
- [9] *Guia para expressão da incerteza de medição*, 3ª edição, ABNT e INMETRO, 2003.