

## AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE CALIBRAÇÃO DE TUBOS DE PITOT COLE COM TIPS MODIFICADOS

*Gilder Nader<sup>1</sup>, Paulo José Saiz Jabardo<sup>2</sup>, Nilson Massami Taira<sup>3</sup>*

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

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, Brazil, pjabardo@ipt.br

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

**Resumo:** Este trabalho tem como objetivo analisar novos *tips* para tubos de Pitot do tipo Cole que apresentam formato com maior robustez, não se quebram ou sofrem deformações, com facilidade, durante o processo de instalação e medição de velocidade de fluidos numa tubulação de água ou gás. Nas análises foram verificadas as variações dos coeficientes de calibração dos lados A e B de quatro tipos diferentes de *tips* de tubos de Pitot do tipo Cole. Essas análises foram realizadas calibrando os quatro novos modelos no túnel de vento aerodinâmico do IPT e comparando os resultados dos coeficientes de calibração obtidos com os do tubo de Pitot Cole convencional.

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

### 1. INTRODUÇÃO

Os tubos de Pitot Cole, ver esquema na Figura 1, são utilizados em mapeamento de velocidade de fluidos [1], como por exemplo, de água ou gases [2], em tubulações com distintos diâmetros, que podem variar desde 300 mm até aproximadamente 3000 mm.

O tubo de Pitot Cole foi desenvolvido para apresentar um coeficiente de calibração ( $C$ ) inferior ao do tubo de Pitot estático (Prandtl), e assim, a leitura do diferencial de pressão ( $\Delta p$ ) obtido pelo tubo de Pitot Cole será maior que o obtido pelo tubo de Pitot estático, permitindo leituras do  $\Delta p$  com maior exatidão. Os valores práticos de  $C$  para o tubo de Pitot estático é  $0,998 \pm 0,002$  [1] e para o tubo de Pitot Cole é 0,87 (média histórica obtidas das calibrações de tubos de Pitot Cole convencionais realizadas no IPT). O cálculo da velocidade ( $u$ ) é obtida por meio da equação de Bernoulli:

$$u = C \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad \text{Eq. (1)}$$

onde  $\rho$  é o valor da massa específica do fluido.

Durante a realização do mapeamento de velocidades em uma tubulação é comum haver acidentes com os *tips* do tubo de Pitot Cole, como por exemplo, a colisão dos *tips* com a parede interna da tubulação, que pode quebrá-lo, produzindo vazamento e consequentemente uma leitura incorreta do diferencial de pressão. Em muitos casos o técnico de pitometria só perceberá o problema ao retirar o tubo de Pitot Cole da tubulação, no final das medições. Dessa forma, terá

que utilizar um outro tubo de Pitot Cole e refazer as medições anteriores, por estarem invalidadas.

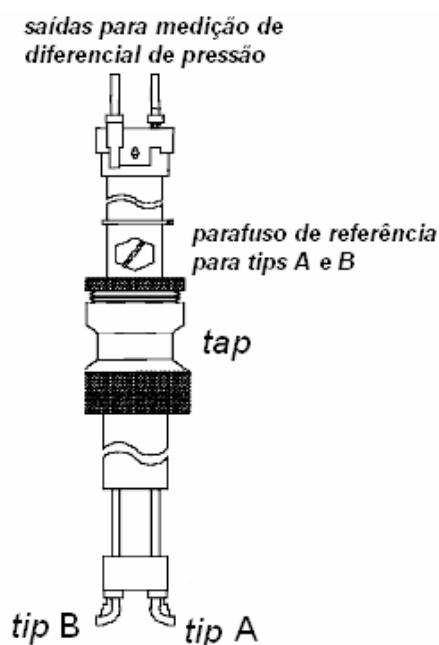


Fig. 1. Principais características de um tubo de Pitot Cole

O Centro de Metrologia de Fluidos (CMF) do IPT projetou novos modelos de *tips* para os tubos de Pitot Cole, tal que estes sejam mais resistentes e tenham um coeficiente de calibração equivalente ao Pitot Cole tradicional.

Os *tips* inicialmente desenvolvidos possuíam formatos prismáticos e cilíndricos, como ilustrados na Figura 2 e posteriormente estes foram modificados para os ilustrados na Figura 3. Dessa forma, nesse artigo será referido como *tip* prismático original e *tip* cilíndrico original os mostrados na Figura 2. E será referido como *tip* prismático alterado e *tip* cilíndrico alterado os mostrados na Figura 3.

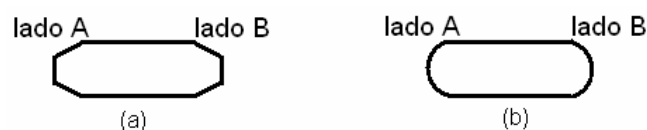


Fig. 2. *tips* (a) formato prismático; e (b) formato cilíndrico

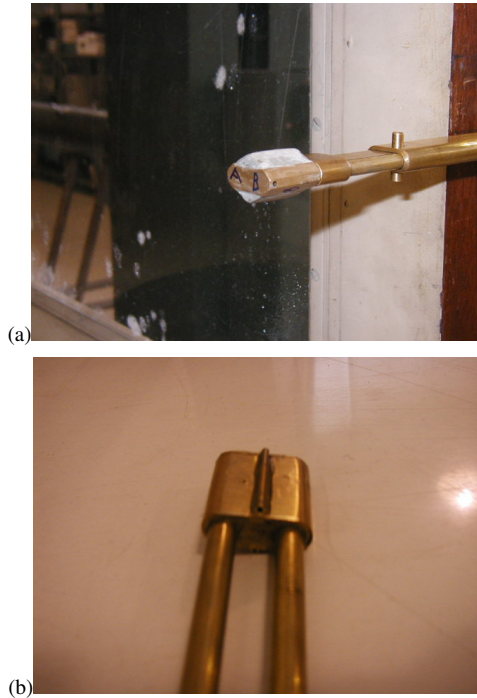


Fig. 3. Foto das alterações realizadas nos tips mostrados na Figura 1

## 2. METODOLOGIA

Na calibração do tubo de Pitot Cole, para cada velocidade, são comparados os valores do diferencial de pressão do Pitot estático, padrão do laboratório de anemometria do IPT, com o diferencial de pressão do Pitot Cole, para a obtenção do coeficiente de calibração ( $C$ ), em cada velocidade do escoamento, da seguinte forma:

$$C = \left( \frac{\Delta P_{PE}}{\Delta P_{PC}} \right)^{1/2} \quad \text{Eq. (2)}$$

sendo:

$\Delta P_{PE}$  – diferencial de pressão do tubo de Pitot estático (Pa);

$\Delta P_{PC}$  – diferencial de pressão do tubo de Pitot Cole (Pa).

As calibrações foram realizadas no Túnel de Vento Aerodinâmico do Laboratório de Anemometria do IPT [3], mostrado na Figura 4a (acreditado na RBC [4]). Foi seguido o procedimento interno CMF-LV-PC18 [5] que é baseado na ISO 3966:1998 [1].

Esse túnel de vento possui seção de testes aberta de 500 mm x 500 mm, faixa de calibração entre 0,2 m/s até 45 m/s [4], perfil de velocidades uniforme e intensidade de turbulência menor que 0,4% [3]. Os instrumentos em calibração, neste caso o tubo de Pitot Cole, são instalados na descarga do túnel de vento, como mostrado na Figura 4b, assim como o padrão de velocidades utilizado, que nestas calibrações foi um tubo de Pitot estático. Cada tubo de Pitot é conectado a um manômetro de coluna inclinada, e foram realizadas duas rampas de calibração para cada lado do tubo de Pitot do tipo Cole com os tips prismático e cilíndrico.

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 uso em água. Assim, utiliza-se nesse procedimento o fator  $Re/L$ ,

onde  $Re$  é o número de Reynolds e  $L$  é o comprimento característico do tubo de Pitot Cole.

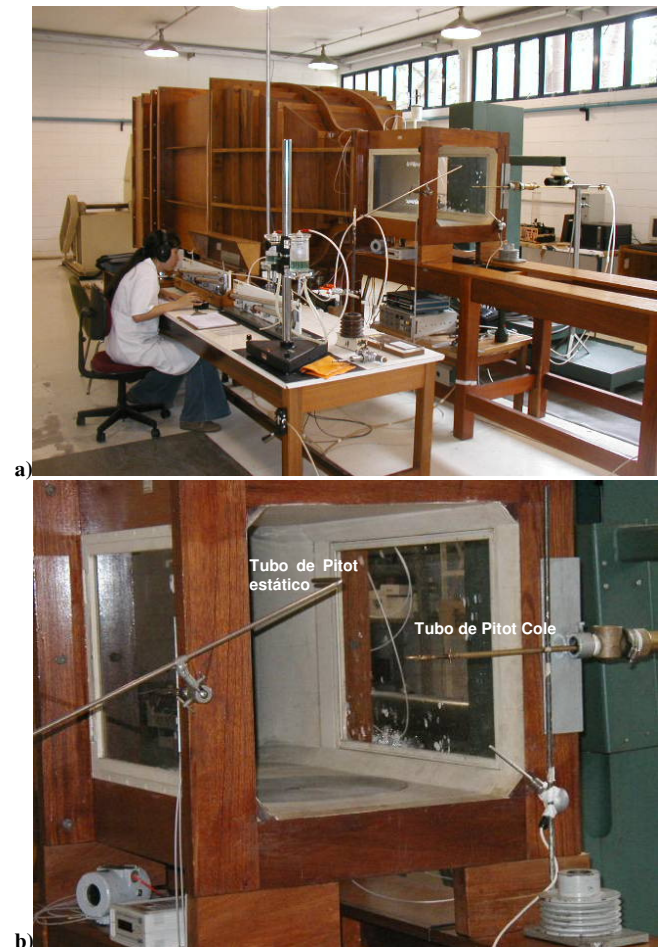


Fig.4. a) túnel de vento aerodinâmico do IPT, utilizado para calibração de sensores de velocidade de fluidos, e b) detalhe do tubo de Pitot estático (padrão) e do tubo de Pitot Cole instalados na descarga do túnel de vento

Os ensaios foram realizados para velocidades do ar entre 6 m/s e 35 m/s, que correspondem em água a velocidades entre 0,4 m/s e 2,4 m/s, pois o fator de conversão utilizado é  $u_{ar} = 15,40 u_{água}$  [6]. E, para transformar de  $Re/L$  para velocidade da água, divide-se o valor deste por aproximadamente  $10^6$ .

Para efeito de análise dos resultados obtidos, será realizada uma comparação com média histórica de calibração de tubos de Pitot Cole convencionais, realizadas no túnel de vento aerodinâmico do IPT.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Média histórica das calibrações de tubos de Pitot Cole

Na Figura 4 é mostrando um gráfico da média histórica de calibrações e tubos de Pitot Cole convencionais realizadas no túnel de vento do IPT.

Deve ser notado que a partir do terceiro ponto de calibração ( $Re/L \approx 0,8 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ ), que equivale a aproximadamente 0,8 m/s em água e 12,3 m/s em ar, o valor de  $C$  está em torno de 0,87. Além disso, os valores dos coeficientes  $C$  decrescem com o aumento da velocidade.

Tomando essa curva como base, serão analisadas as vantagens e desvantagens dos novos formatos de *tips*.

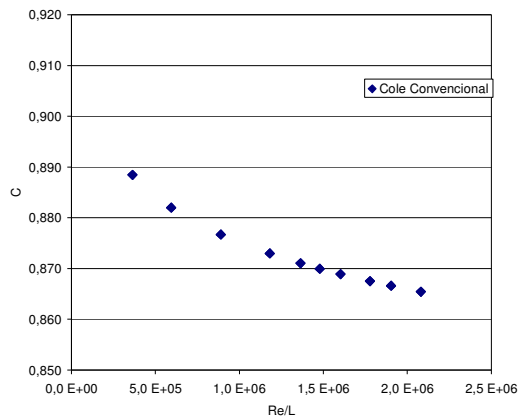


Fig 4. Resultados da média história de calibrações de tubos de Pitot Cole convencionais.

### 3.2 Tips prismáticos

Na Figura 5 são mostrados os resultados de  $C$  obtidos para os *tips* prismáticos antes e depois da alteração. No Anexo A são mostrados os resultados tabelados, incluindo as incertezas expandidas.

Deve ser notado que antes da alteração dos *tips* prismáticos foi obtido um valor alto de  $C$  (até 0,93) em relação ao valor prático (0,87), o que diminui o valor do diferencial de pressão lido. Além disso, nota-se que o *tip* prismático original não estava simétrico nos lados A e B, pois a partir do terceiro ponto obteve-se para o lado A  $C$  em torno de 0,93 e para o lado B  $C$  em torno de 0,91.

Após esse teste o *tip* foi re-usinado, para que se tornasse simétrico em ambos os lados, e foi adicionada a massa epóxi em forma piramidal (ver Figura 2a). Os resultados obtidos com essa alteração também estão ilustrados na Figura 5. Verifica-se que a partir do terceiro ponto, os valores de  $C$ , para os lados A e B, tendem a ficar na faixa de 0,88, que é muito próximo do valor prático.

No entanto, cabe ressaltar que ao contrário dos resultados do tubo de Pitot Cole convencional, os valores de  $C$  para os *tips* prismáticos (alterado e original) aumentam com a velocidade. E, especificamente para o caso dos *tips* prismáticos alterados os valores de  $C$  variam de 0,86 até 0,88, que estão em torno do valor prático de  $C$  (0,87).

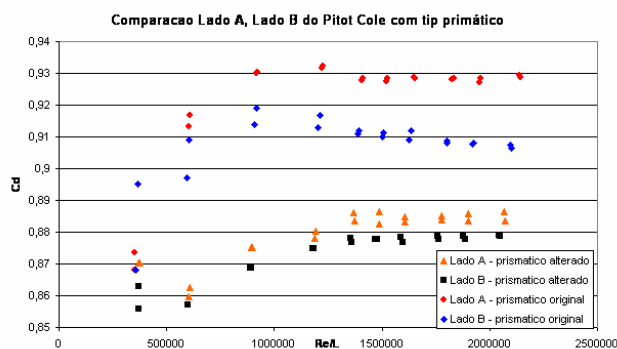


Fig 5. Resultados experimentais obtidos para os *tips* prismáticos

### 3.3 Tips cilíndricos

A calibração do tubo de Pitot Cole com o *tip* cilíndrico original apresentou os resultados ilustrados na Figura 4. Na análise do *tip* cilíndrico original notou-se simetria entre os lados A e B, pois os resultados são similares. Porém, o valor médio do  $C$  a partir do terceiro ponto ficou na faixa de 0,9 e uma grande dispersão dos resultados para  $Re/L \approx 0,4 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ , pois, não só os valores de  $C$  obtidos nas duas rampas de calibração para cada lado apresentam dispersão, como também houve dispersão entre os valores obtidos entre os lados A ( $C \approx 0,85$ ) e B ( $C \approx 0,88$ ) dos *tips*.

Assim, optou-se por realizar uma alteração nesse *tip*, fixando tubos cilíndricos (Figura 2) na tentativa de diminuir o valor de  $C$  e também da dispersão. Como pode ser visto na Figura 6, os novos valores ficaram mais baixos, na faixa de 0,88 a partir do terceiro ponto, e a dispersão também diminuiu. Um ponto que chama a atenção é o grande salto do valor de  $C$  entre o primeiro e segundo ponto de calibração, pois o valor passou de 0,82 para 0,87, indicando que para esses *tips* poderem ser utilizados para medições de baixas velocidades (abaixo de 0,6 m/s em água) há necessidade de maior discretização dos pontos de calibração.

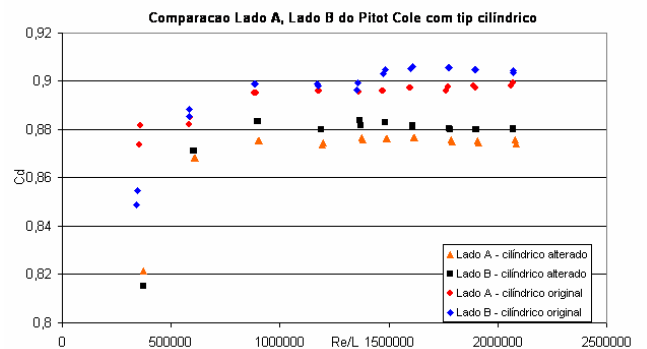


Fig 6. Resultados experimentais obtidos para o *tip* cilíndrico

### 3.4 Resumo dos resultados obtidos

Analisando os resultados mostrados nas Figuras 5 e 6, nota-se que os *tips* modificados, mostrados na Figura 2, apresentam melhores resultados. O tubo de Pitot com o *tip* prismático alterado apresenta  $C$  na ordem de 0,865 entre 0,4 e 0,8 m/s, para velocidade da água, e a partir de partir de 1 m/s apresenta  $C = 0,88$ . O tubo de Pitot com o *tip* cilíndrico apresenta variação do  $C$  de 0,82 até 0,87 entre as velocidades 0,4 e 0,6 m/s, ficando estável em 0,88 a partir de 0,8 m/s.

## 4. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Foram analisadas 4 alterações dos *tips* de tubos de Pitot Cole, descritas nesse artigo como: prismático original; prismático alterado; cilíndrico original; e cilíndrico alterado. Somente os *tips* classificados como alterados apresentaram resultados que podem ser considerados satisfatórios, pois possuem valores menores dos coeficientes de calibração  $C$  (na faixa de 0,88) e baixa dispersão dos resultados. Além disso, ambos apresentam resultados estáveis de  $C$  para velocidades da água acima de 1 m/s.

O *tip* cilíndrico alterado apresenta uma característica particular, que é a grande variação do valor de *C* para velocidades em água inferiores a 0,6 m/s, indicando que nessa faixa, deve ser realizada uma calibração com maior discretização.

Para confirmação se estes *tips* prismático e cilíndrico alterados são aceitáveis, serão feitos, como trabalhos futuros, medições comparativas de mapeamento de velocidades de fluidos em dutos, entre tubo de Pitot Cole com *tips* convencionais e esse com o *tip* prismático alterado.

## AGRADECIMENTOS

À empresa Mecaltec que se dispôs a usar os *tips* seguindo as especificações fornecidas pela equipe técnica do IPT.

## REFERENCIAS

- [1] ISO 3966:2008, *Measurement of fluid flow in closed conduits - Velocity area method using Pitot static tubes*.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] [http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/detalhe\\_laboratorio.asp?num\\_certificado=162&area=VAZ%C3O](http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/detalhe_laboratorio.asp?num_certificado=162&area=VAZ%C3O). (acessado em 08.07.2011)
- [5] CMF-LV-PC18 – *Procedimento para calibração de Tubo de Pitot tipo Cole com ar*, procedimento interno do IPT.
- [6] J. G. Sanchez, G. do Espírito Santo, *Alternative method for calibration of Cole type Pitot tube*, Flomeko 98, Suécia, junho, 1998.
- [7] G. Nader, O. Yoshida, N.M. Taira.– *Análise da influência da mudança de ângulos de roll e yaw de tubo de Pitot Cole na medição da velocidade do escoamento*. Submetido ao II CIMMEC.
- [8] *Guia para expressão da incerteza de medição*, 3ª edição, ABNT e INMETRO, 2003.

## ANEXO A

Neste anexo são apresentados os valores tabelados das calibrações dos tubos de Pitot do tipo Cole com *tips* prismático e cilíndrico alterados.

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 %.

Na Tabela A1 são apresentados os dados da calibrações dos lados A e B do *tip* prismático alterado. Na Tabela A2 são apresentados os dados da calibrações dos lados A e B do *tip* cilíndrico alterado.

Tabela A1. Resultados experimentais - *tips* prismáticos

Lado A		Lado B	
Re/L x10 <sup>6</sup> (m <sup>-1</sup> )	C	Re/L x10 <sup>6</sup> (m <sup>-1</sup> )	C
0,375	0,821	0,372	0,815
0,608	0,868	0,604	0,871
0,902	0,875	0,897	0,883
1,197	0,874	1,189	0,880
1,378	0,876	1,370	0,883
1,491	0,876	1,482	0,883
1,616	0,877	1,608	0,881
1,788	0,875	1,779	0,880
1,911	0,875	1,900	0,880
2,083	0,875	2,071	0,880

Incerteza expandida:

Lado A -  $C = 0,008$  para a para a faixa de Re/L entre  $(0,902 \times 10^6$  e  $2,083 \times 10^6)$  m<sup>-1</sup>.

Lado B -  $C = 0,008$  para a para a faixa de Re/L entre  $(0,897 \times 10^6$  e  $2,071 \times 10^6)$  m<sup>-1</sup>.

Tabela A2. Resultados experimentais - *tips* cilíndricos

Lado A		Lado B	
Re/L x10 <sup>6</sup> (m <sup>-1</sup> )	C	Re/L x10 <sup>6</sup> (m <sup>-1</sup> )	C
0,374	0,870	0,376	0,859
0,607	0,863	0,600	0,858
0,900	0,875	0,895	0,869
1,192	0,880	1,187	0,875
1,373	0,884	1,396	0,877
1,491	0,883	1,486	0,877
1,609	0,883	1,604	0,878
1,780	0,884	1,774	0,878
1,902	0,883	1,897	0,879
2,073	0,883	2,068	0,879

Incerteza expandida:

Lado A -  $C = 0,010$  para a para a faixa de Re/L entre  $(0,900 \times 10^6$  e  $2,073 \times 10^6)$  m<sup>-1</sup>.

Lado B -  $C = 0,010$  para a para a faixa de Re/L entre  $(0,895 \times 10^6$  e  $2,068 \times 10^6)$  m<sup>-1</sup>.