

## AVALIAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO COM MÚLTIPLAS TOMADAS DE EVALUATION OF FLOW METERS WITH MULTI-PORT PRESSURE

**Nicanor Alencar Camapum Filho<sup>1</sup>**  
**Milton Dall'Aglio<sup>2</sup>**

1- Engenheiro Civil – UNOESTE. Engenheiro Mecânico – FENSUPI. Especialização em Engenharia Sanitária – UNESP. Mestrando em Engenharia Civil na área de Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais – UNESP.

2 - Engenheiro Civil. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo EESC-USP. Professor do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Ilha Solteira.

**Endereço:** Rua Arthur Villa Real, 217- Vila Formosa- CEP 19013-570- Presidente Prudente – SP- e-mail: nicanoracf@sabesp.com.br

### RESUMO

Avalia-se um medidor de vazão prático e econômico, que integra uma haste de inserção multifuros tradicional a um moderno sensor inteligente e um sistema digital de aquisição e condicionamento de dados com microprocessador embutido. Vários medidores estão em serviço contínuo em redes de abastecimento de água, com bons resultados. Dois medidores, com hastes de 1 e de 7 furos, foram aferidos em seções com perfil de velocidade simétrico e assimétrico, utilizando um Pitot Cole padrão. Embora a sonda de 7 furos seja menos sensível às assimetrias do perfil, o menor erro médio (2,2% da leitura) foi obtido em perfil simétrico. O erro com 95% de confiança foi  $\pm 3,9\text{m}^3/\text{h}$  (2,3% da vazão máxima). O sistema mostrou-se tecnicamente viável, de baixo custo, de fácil instalação e, portanto, adequado para atender uma demanda reprimida por macromedidores nos sistemas de abastecimento brasileiros.

### ABSTRACT

A practical and inexpensive flow measurement system, made by integration of a traditional multi point insertion probe, and up to date smart pressure sensor and a digital system of data acquisition and conditioning with embedded computing power is considered. Several meters have been used on continuous operation in water supply systems with good results. Two probes, with 1 and 7 orifices, were calibrated in sections with symmetrical and asymmetrical velocity profiles, using a Pitot Cole standard. Although the 7 orifices probe was less sensitive to asymmetry, the smallest mean error (2.2% of the reading) was obtained in symmetrical profiles. The 95% confidence error band was  $\pm 3.9\text{m}^3/\text{h}$  (2.3% full scale). The system has shown its technical feasibility, it is inexpensive, easy to install, and hence it is appropriate to attend a repressed demand for master metering in the Brazilian public water supply systems.

**Palavras-chave:** Medidor de vazão; Medidor de inserção; Pitot Multifuros; Macromedição

**Key words:** Flow meter; Insertion meter, Multi-Port Pitot Tube, Master metering.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da instrumentação industrial, a medição de vazão ganhou em precisão, confiabilidade e versatilidade, podendo ser aplicada a condições de serviço cada vez mais diversificadas. A variedade dos tipos e modelos de instrumentos de medição de vazão obriga o especialista a uma constante atualização e aumenta a distância que o separa do usuário que aplica este vasto conjunto de técnicas à própria indústria. Desta forma, a escolha do sistema de medição mais adequado para determinada aplicação é freqüentemente um problema para o engenheiro de campo, embaraçado diante de muitas alternativas.

Nas tubulações destinadas ao abastecimento público de água, seja em redes de distribuição, subadutoras ou adutoras, há necessidade de instalação de medidores de vazão para aperfeiçoamento dos programas de controle de perdas e pesquisas de vazamentos.

Atualmente, o medidor de vazão mais utilizado pelas companhias de saneamento do Brasil é o eletromagnético, seguido pelos medidores do tipo Annubar e ultrassônico, que aos poucos têm tomado o lugar dos medidores do tipo turbina, tanto os de seção total como de inserção, no ranking de aplicação.

Essa composição dos produtos comercialmente oferecidos em nosso mercado ignora, em grande parte, as possibilidades dos tradicionais medidores deprimogênicos de inserção. Entretanto, como resultado da evolução da instrumentação digital, aliado ao grande uso de medidores tipo orifício na indústria em geral, transdutores de pressão e condicionadores digitais de sinal de excelente desempenho são disponíveis hoje, a custos relativamente baixos. Nesse contexto, um sistema de medição composto de uma sonda de inserção tradicional, do tipo Pitot, acoplada a um moderno sistema digital de instrumentação, apresenta-se como solução tecnicamente viável, de custo baixo e adequada às condições operacionais dos sistemas de distribuição brasileiros.

A partir dessas premissas, este trabalho propõe-se a avaliar, em condições reais de operação, o desempenho e a confiabilidade de um sistema de medição de vazão composto de medidores de inserção com múltiplos furos, tradicionalmente recomendados (AWWA 1997, Cap. 20), acoplado a um sistema digital de aquisição e tratamento de dados, composto de transdutores de pressão e condicionador/transmissor do tipo industrial. Esse sistema viabiliza as medições contínuas de vazão para grandes diâmetros, com baixo grau de incerteza, baixo custo e facilidade de instalação e manutenção. Apresenta, portanto, grande

potencial para enfrentar a deficiência de macromedições nos sistemas de abastecimento públicos, ao evitar o custo elevado de aquisição dos medidores usuais existentes e as dificuldades para instalá-los.

A Tabela 1 apresenta uma breve comparação de custos entre dois dos medidores de vazão mais difundidos atualmente no mercado e o sistema proposto. Os custos consideram as marcas mais utilizadas e incluem os acessórios necessários para a montagem e operação.

**Tabela 1: Custos de alguns medidores mais difundidos nas concessionárias de saneamento. Composição do custo: medidor (primário), indicador (secundário), fonte e acessórios de instalação.**

Diâmetro (mm)	Eletromagnético (R\$)	Annubar (R\$)	Medidor Proposto (R\$)
100	8.900,00	6.429,00	3.000,00
200	10.450,00	6.620,00	3.050,00
300	12.900,00	6.859,00	3.150,00
500	18.550,00	7.552,00	3.300,00
800	37.400,00	10.202,00	3.500,00

Um sensor de inserção dispensa o seccionamento da tubulação para sua instalação, tornando a montagem prática e simples. A haste de múltiplos furos permite diminuir problemas com entupimentos, com a vantagem de ser menos sensível a variações do perfil de velocidades, decorrentes de incrustações ou outras causas que afetem as condições do escoamento. Para verificar essa característica o desempenho da haste com múltiplos furos foi comparado ao de uma haste de apenas 1 furo.

A escolha dos locais para os testes com os medidores foi baseada na necessidade de criação de um laboratório prático e versátil que permitisse manipulações das condições de escoamento. Isto foi possível, com a introdução de poucas modificações, nas instalações da ETA de Presidente Prudente-SP que abastece a zona denominada de Alto ETA. Existe também a necessidade de avaliar o desempenho do medidor em condições reais, incluindo diversos diâmetros e materiais de rede em saídas de reservatórios, objetivando determinar sua capacidade, limites e características técnicas. Desta forma, procurando também ajudar nas gestões operacionais locais, outros pontos foram escolhidos para a instalação do aparelho investigado, conforme lista a seguir:

- Um sistema de bombeamento para rede de distribuição, com derivação para dois setores (Alto da Boa Vista e Jd. Bongiovani), cujas redes de distribuição possuem diâmetros de 250mm em fibrocimento, no Município de Presidente Prudente (foi instalado um

medidor para cada derivação);

- Uma rede de saída por gravidade, com diâmetro de 250mm em fibrocimento, no Reservatório da Vila Formosa no Município de Presidente Prudente;
- Uma tubulação de saída de água tratada (distribuição em marcha), com diâmetro de 500mm, em Ferro Fundido na ETA do município de Presidente Epitácio;
- Uma tubulação de saída do booster do Bairro São João, com diâmetro de 200mm, em PVC DeFoFo, no município de Presidente Prudente;
- Uma tubulação de divisa de setor geográfico de abastecimento, na ponte do Jardim Santa Fé, com diâmetro de 300mm, em Ferro Fundido no município de Presidente Prudente;
- Uma rede de saída por gravidade, com diâmetro de 300mm em fibrocimento, para abastecimento dos bairros Cohab e CECAP, no Reservatório da Cohab no Município de Presidente Prudente;
- Uma rede de saída por bombeamento, com diâmetro de 200mm em PVC DeFoFo, no Reservatório da Cohab no Município de Presidente Prudente.

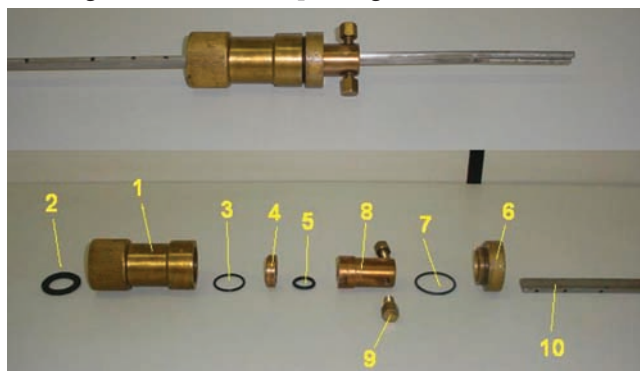
No município de Presidente Prudente estas instalações estão sendo utilizadas para estudos de perdas físicas de água.

## METODOLOGIA

### Construção das sondas

As sondas foram constituídas de dois tubos de aço inoxidável com comprimento variável ajustando-se a cada tubulação,  $\varnothing$  6 mm externo e  $\varnothing$  4 mm interno, com orifícios de  $\varnothing$  4 mm, atendendo à classe de pressão PN 20. As pressões são coletadas nos tubos que constituem os bordos de ataque e de fuga do perfil da haste, constituindo um medidor do tipo diferencial.

Os tubos são alojados num corpo de bronze, que acomoda dois *o' rings* de borracha crua para vedação e permite a introdução e fixação do conjunto no TAP de instalação no tubo. Os detalhes construtivos do medidor investigado são ilustrados pela Figura 1.



**Figura 1 – Foto do medidor montado e dos componentes do medidor investigado.**

A parte inferior da Figura 1 detalha, em vista explodida, os componentes do medidor, listados a seguir: 1- Base de Bronze SAE 40; 2- Junta de vedação em lençol de borracha com lona simples para fixação da Base de Bronze no TAP; 3- Anel O'ring de borracha Buna N para vedação na base do prato intermediário; 4- Prato intermediário em Bronze SAE 40; 5- Anel O'ring (Buna N) para vedação na parte superior do prato intermediário; 6- Porca vazada recartilhada em Bronze SAE 40; 7- Anel O'ring (Buna N) para vedação na base da Porca recartilhada; 8- Mancal guia deslizante em Bronze SAE 40; 9- Parafusos em Bronze SAE 40 sextavados; 10- Haste multifuros em aço inoxidável 316.

Foram utilizadas duas hastes, diferindo apenas no número de furos, sendo uma com 7 furos no bordo de ataque e 7 no bordo de fuga, enquanto que a segunda haste dispunha de apenas um furo central para cada tomada de pressão. Para determinação do posicionamento dos furos, foi seguido o critério de coroas circulares de áreas iguais. A Figura 2 ilustra o aspecto das hastes utilizadas.



Figura 2 – As duas hastes de aço inoxidável com 1 furo e 7 furos

Foram utilizadas duas hastes, diferindo apenas no número de furos, sendo uma com 7 furos no bordo de ataque e 7 no bordo de fuga, enquanto que a segunda haste dispunha de apenas um furo central para cada tomada de pressão. Para determinação do posicionamento dos furos, foi seguido o critério de coroas circulares de áreas iguais. A Figura 2 ilustra o aspecto das hastes utilizadas.

O transdutor de pressão diferencial utilizado foi o modelo LD301, da Smar, cuja concepção é de célula capacitiva. O sensor possui um sistema de compensação de temperatura e uma memória não volátil com um mapeamento da sua curva de calibragem individual. O transdutor de pressão opera em conjunto com um condicionador de sinal que possui uma CPU – Unidade Central de Processamento – incorporada, com várias possibilidades de filtragem e condicionamento digital dos sinais, além de saída analógica de 4 a 20 mA Possui também display para leitura local da pressão ou da vazão, em diversas unidades de engenharia.

### Instalações para calibragem

O trabalho de calibragem foi desenvolvido nas dependências da Sabesp de Presidente Prudente-SP. As medições foram realizadas nas instalações da saída para abastecimento da zona Alto ETA. Para investigar se os múltiplos furos efetivamente compensam a assimetria dos perfis de velocidade, os resultados da sonda de 7 furos foram comparados com os da sonda de apenas um furo, nas situações de perfil simétrico e assimétrico.

Foram implantados 3 TAPs no laboratório prático denominado Alto ETA: O TAP<sub>1</sub> com perfil de velocidade axialmente assimétrico, num trecho vertical situado a 0,22 m a jusante de uma curva inferior na saída do barrilete das bombas; o TAP<sub>2</sub>, destinado a ensaiar o medidor em seção com perfil de velocidade axialmente simétrico e o TAP<sub>3</sub>, destinado ao Pitot Cole utilizado como padrão, ambos em trecho horizontal de tubulação.

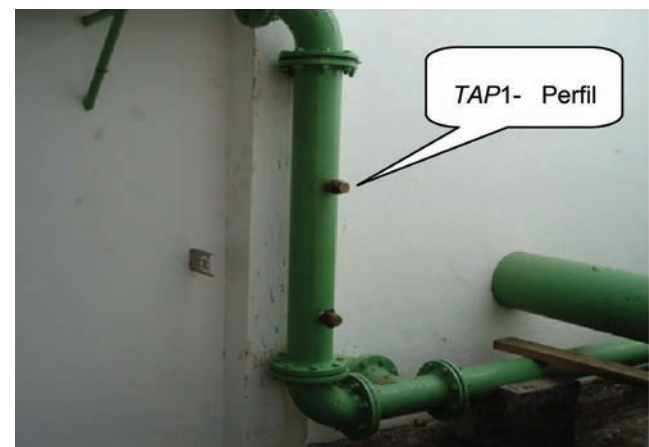


Figura 3 – TAP 1 instalado em local de escoamento com assimetria axial

Os perfis de velocidade nas 3 seções foram determinados com a utilização do Tubo Pitot Padrão, com 11 leituras com medidas descendentes e onze ascendentes para cada TAP. A Figura 4 apresenta os perfis de velocidade característicos das duas seções de calibragem utilizadas, caracterizando uma situação recomendada de perfil simétrico (TAP2) e uma de perfil assimétrico (TAP1).

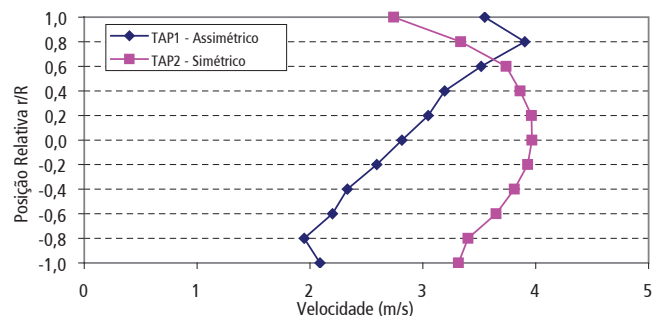


Figura 4 – Perfis de velocidade nas duas seções utilizadas para calibração

Foram utilizados, em cada instalação dos medidores: 1- Dois TAP's para instalação na tubulação, com colares de tomada quando necessário (rede fibrocimento); 2- Um Tubo Pitot Cole calibrado; 3- Um Calibre para determinação do diâmetro real interno da tubulação; 4- Transmissor/condicionador de pressão acoplado ao Pitot para determinação das deflexões; 5- Um notebook com planilha em Excel para determinação das vazões com o tubo Pitot Cole.

### Procedimento de calibragem

As sondas foram calibradas com a utilização de um tubo de Pitot Cole como padrão, instalado no TAP<sub>3</sub>. Na seção padrão foi levantado um perfil de velocidades para uma determinada vazão. As deflexões do Pitot Cole foram medidas com um sistema desenvolvido pelo IPT em 2003 com tecnologia digital de aquisição de dados.

O coeficiente de velocidade do tubo padrão foi calculado da forma usual, conforme recomendado pela Sabesp (1984), com a integração do perfil de velocidades da seção. A partir daí, para cada vazão de ensaio, efetuava-se a leitura com o padrão na linha central do tubo, calculando-se a vazão por meio do coeficiente.

Foram levantadas curvas de calibragem das sondas de 7 furos e de 1 furo nas seções de perfil simétrico (TAP<sub>2</sub>) e assimétrico (TAP<sub>1</sub>). O limite inferior de vazões corresponde a uma velocidade mínima de 0,3 m/s, que é também o limite prático de emprego do Tubo de Pitot, segundo Taira (2003).

Foram realizados dois ensaios de calibração, cada um com 10 vazões, correspondentes a velocidades variando aproximadamente entre 0,3m/s e 3m/s. No primeiro ensaio, a sonda de 1 furo foi instalada no Tap1 e a de 7 furos no Tap2. No segundo ensaio, as posições das sondas foram alternadas. Em cada ensaio, foi registrada a vazão padrão, a vazão indicada pelo transmissor/condicionador de dados, denominada de Q<sub>M</sub>, e a deflexão em mm de coluna de água correspondente ao diferencial de pressão verificado nas hastes ensaiadas.

### Metodologia de análise dos dados

A análise dos dados baseou-se na comparação direta dos valores de vazão fornecidos pelo transmissor/condicionador de sinais (Q<sub>M</sub>) com a vazão padrão (Q<sub>P</sub>) e na determinação de curvas de ajuste da deflexão medida nas hastes em função da vazão padrão.

A vazão Q<sub>M</sub> é fornecida a partir de ajustes efetuados durante a instalação dos medidores em campo. Este procedimento emprega as leituras do tubo de Pitot padrão, e uma das equações de calibragem disponíveis em firmware. O valor da vazão é inserido em menu apropriado do sistema computadorizado de condicionamento do sinal, com possibilidade de inserção de tabelas de até 10 pares de dados, para interpolação dos valores de vazão.

A partir daí o transmissor de dados passa a registrar diretamente o valor instantâneo da vazão em unidades de engenharia. Esta vazão Q<sub>M</sub> representa, portanto, o valor que seria obtido numa instalação normal de campo dos medidores. A leitura de Q<sub>M</sub> vale-se de rotinas internas (firmware) do condicionador de sinais para converter o sinal de pressão diferencial em vazão, incluindo algoritmos de filtragem e de médias móveis otimizados para medidores de vazão tipo deprimogênio, amplamente utilizados na indústria.

Na calibragem realizada na estação alto ETA, o erro da leitura de vazão Q<sub>M</sub> foi avaliado a partir do ajuste por mínimos quadrados de retas em função de Q<sub>P</sub> ( $Q_M = m'Q_P$ ). As curvas de utilização são do tipo  $Q_{\text{real}} = m Q_M \cdot m'$  e  $m$  e  $m'$  são coeficientes de proporcionalidade ajustados.

Durante a calibragem, além do valor de vazão em unidades de engenharia, foram lidos também valores instantâneos da pressão diferencial, em mca, o que permitiu o ajuste das curvas de vazão em função da pressão diferencial. O uso das leituras de diferencial de pressão, ou deflexão, foi necessário para se investigar a efetividade do medidor de 7 furos, em comparação com o de 1 furo, na atenuação das condições hidráulicas desfavoráveis de um perfil diferente do utilizado na calibragem. Embora sejam leituras fornecidas pelo mesmo transdutor de pressão e condicionador de sinais, apenas com mudança nas funções de apresentação de dados do equipamento, a leitura das deflexões foi instantânea. Portanto, as deflexões não sofreram os mesmos processos de condicionamento digital que resultaram nas vazões Q<sub>M</sub>.

Com os dados de pressão diferencial, foram ajustadas equações de calibragem do tipo exponencial ( $\Delta P_i = m' Q_{P_i}^{b'}$ ) em que o expoente  $b'$  é variável, e também com o valor fixo de  $b' = 2$ . Na calibragem, os limites de erro da vazão podem ser determinados a partir da variância da variável independente  $S_x^2$ . A situação de uso de um medidor difere da situação da calibragem porque, durante o uso do medidor, a variável independente passa a ser a leitura fornecida pelo instrumento, e a variável dependente passa a ser a vazão, que é desconhecida (Doebelin, 1990). Como equação de utilização do medidor, foram utilizadas expressões derivadas das anteriores, do tipo  $Q_{A_i} = m \Delta P_i^b$ . Nesse caso, os limites de erro são calculados a partir da variância da variável dependente  $S_y^2$ . As faixas de erro são calculadas com 95% de confiança, multiplicando-se  $S_y$  por um fator 2 (Doiron et al, 1997).

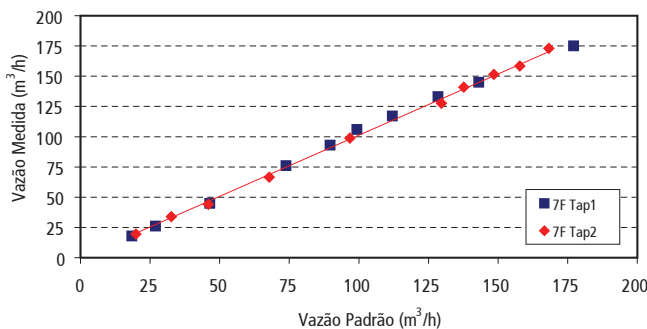
### RESULTADOS

A Tabela 2 resume os dados das regressões lineares realizadas com os dados da vazão medida pelo transmissor/condicionador de sinais e a vazão padrão determinada com o tubo de Pitot, bem como os erros esperados durante a utilização do medidor.

**Tabela 2: Correlação entre a vazão do medidor  $Q_M$  e a vazão do tubo de Pitot ( $Q_p$ ) para as sondas de 1 furo (1F) e de 7 furos (7F) em perfil assimétrico (T1) e simétrico (T2).**

	Dados da Correlação QM x QP			
	1F T1	1F T2	7F T1	7F T2
m	0,9965	0,9905	0,9815	0,9875
r2	0,997	0,992	0,997	0,999
Erro Médio (%)	3,1	3,6	3,2	2,2
Sy (m3/h)	4,37	4,25	3,53	2,53
Faixa de Erro (95%) (m3/h)	6,31	8,65	5,50	3,86

A Figura 5 apresenta graficamente os resultados do ajuste obtido entre a vazão medida  $Q_M$  e a vazão padrão  $Q_P$  para a sonda de 7 furos nas situações de perfil simétrico (Tap 2) e assimétrico (Tap 1).



**Figura 5: Relação entre a vazão medida  $Q_M$  e a vazão padrão obtida com o medidor com haste de 7 furos no perfil assimétrico (Tap 1) e simétrico (Tap 2).**

A Tabela 3 resume os resultados do ajuste entre as deflexões, em mca e a vazão padrão, em  $m^3/h$ , utilizando a equação exponencial. A Tabela 4 apresenta as mesmas informações, relativas ao ajuste da equação quadrática.

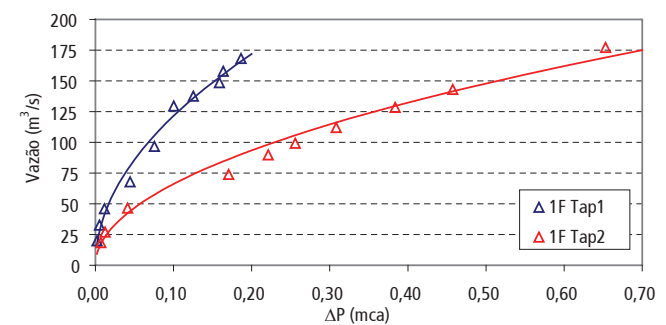
**Tabela 3: Dados do ajuste de curva exponencial ( $Q = m\Delta P^b$ ) aos dados experimentais das sondas de 1 furo (1F) e de 7 furos (7F) em perfil assimétrico (T1) e simétrico (T2).**

Dados do Ajuste de $Q_p$ ( $m^3/h$ ) x $\Delta P$ (mca)				
	1F T1	1F T2	7F T1	7F T2
m	353,9	200,2	213,0	220,2
b	0,459	0,471	0,445	0,488
r2	0,997	0,994	0,995	0,986
Sy	4,91	6,03	6,20	4,37
Erro Médio (%)	3,18	4,94	4,25	5,91

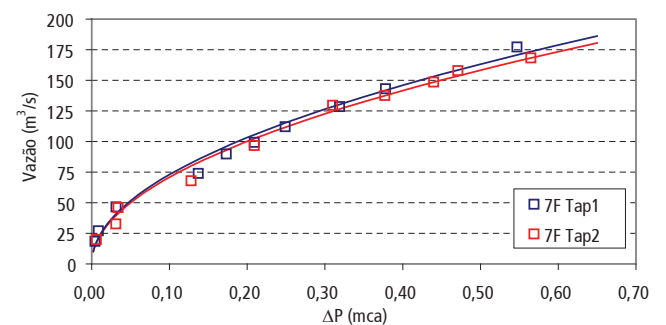
**Tabela 4: Dados do ajuste de curva quadrática ( $Q = m\Delta P^{0,5}$ ) aos dados experimentais das sondas de 1 furo (1F) e de 7 furos (7F) em perfil assimétrico (T1) e simétrico (T2).**

Dados do Ajuste de $Q_p$ ( $m^3/h$ ) x $\Delta P$ (mca)				
	1F T1	1F T2	7F T1	7F T2
m	384,4	209,1	230,8	225,4
b	0,5	0,5	0,5	0,5
r2	0,986	0,990	0,9915	0,994
Sy	5,02	5,09	4,79	4,01
Erro Médio (%)	7,55	6,26	9,18	6,14

A Figura 6 apresenta os resultados do ajuste obtido entre a deflexão e a vazão para a sonda de 1 furo nas situações de perfil simétrico (Tap 2) e assimétrico (Tap 1). A Figura 7 apresenta os mesmos resultados do ajuste entre a deflexão e a vazão para a sonda de 7 furos nas situações de perfil simétrico (Tap 2) e assimétrico (Tap 1). As equações das curvas de ajuste apresentadas são do tipo coeficiente constante ( $m = 0,5$ ).



**Figura 6: Dados experimentais e curva ajustada aos dados obtidos com o medidor de 1 furo nas duas seções ensaiadas.**



**Figura 7: Dados experimentais e curva ajustada aos dados obtidos com o medidor de 7 furos nas duas seções ensaiadas.**

## DISCUSSÃO

Os medidores investigados neste trabalho foram testados em água tratada, com ausência de sólidos em suspensão e em pressões que variaram de 2mca a 150mca,

em utilização contínua por períodos de mais de 24 meses, situações nas quais apresentaram bom desempenho. O primeiro medidor foi instalado em junho de 2003, na rede de fibrocimento de 250mm, na Vila Formosa, e não sofreu intervenção para reparos ou limpeza até o momento. Nas aferições periódicas já realizadas em campo, os desvios situaram-se na faixa de 0,5 a 1%. Esse dado mostra que não ocorreram problemas com a obstrução dos furos da haste nas condições em que os medidores estão operando.

A experiência de uso abrangeu diâmetros de até 500mm, sem registro de problemas devido aos esforços hidrodinâmicos nas hastes. Ressalta-se que a proposta construtiva resulta numa haste com grande resistência mecânica na direção do fluxo, podendo entretanto ocorrer oscilações transversais devido aos vórtices produzidos pela haste. No caso de grandes esforços mecânicos sobre a haste, o efeito danoso poderia ser compensado com a aplicação de outro TAP na posição diametralmente oposta ao primeiro, passando o ponto de maior esforço para o centro da haste e reduzindo o momento fletor. Assim, com base na experiência de uso, pode-se defender um limite de 1,0m de diâmetro, sem modificações expressivas no desenho das hastes, apenas acrescentando-se o segundo TAP para apoio.

Como se pode observar na relação de erros da Tabela 2, a sonda que apresentou o menor desvio foi a haste de sete furos e seu melhor desempenho foi observado no TAP2 cujo perfil de velocidade é simétrico. Os erros médios na utilização da haste de 7 furos situaram-se entre 2,2% da leitura, no perfil simétrico, e 3,2% no assimétrico. Para a haste de 1 furo, o erro foi ligeiramente menor para o perfil assimétrico (3,2%) que para o perfil simétrico (3,6%).

O bom ajuste das leituras de vazão em relação à vazão padrão pode ser verificado na Figura 5, para as duas condições de perfil, registrando-se que os valores experimentais das duas seções agrupam-se praticamente sob a mesma equação linear de regressão. Utilizando-se o intervalo de confiança de 95% (2S) obtém-se um limite para a faixa de erro de  $\pm 3,9\text{m}^3/\text{h}$  na utilização do medidor com a haste de 7 furos calibrada em perfil simétrico e de  $\pm 5,5\text{m}^3/\text{h}$  para a calibragem em perfil assimétrico.

É interessante verificar também que no caso, teoricamente não recomendável, de utilização da equação de calibragem obtida no Tap2 para calcular as vazões reais de um perfil assimétrico como o Tap1, seria obtida uma faixa de erro praticamente igual a da calibragem local. A faixa de erro (2S) subiria de  $\pm 5,5\text{m}^3/\text{h}$  para apenas  $\pm 5,7\text{m}^3/\text{h}$ . Provavelmente esses dados não podem ser extrapolados para qualquer situação de assimetria de perfil, mas constituem um indicativo da baixa sensibilidade do sensor de múltiplos furos a variações pequenas no perfil de velocidades.

Os valores relativamente baixos da faixa de erro máximo provável obtidos colocam o medidor investigado

na mesma faixa de desempenho do tubo de Pitot Cole, o que coloca em questão seu uso como padrão de calibração. O valor verdadeiro convencional utilizado como padrão em uma aferição deve possuir margens de erro menores que o instrumento a ser calibrado, sendo o ideal pelo menos uma ordem de grandeza menor (Upp, 1993, Bolton, 1996). Para medição de vazões de água, o método volumétrico direto seria um padrão mais adequado, devido a sua simplicidade. Entretanto, além de modificações nas tubulações seria necessário interromper o abastecimento para a realização das medições, o que inviabilizaria o trabalho. Assim, devido à impossibilidade prática de adoção do método volumétrico direto na instalação em escala real utilizada, o Tubo de Pitot Cole foi utilizado como padrão de comparação.

Comparando-se os dados de incerteza da Tabela 2 com os das tabelas 3 e 4, observa-se que os ajustes de equações às deflexões produziram resultados sensivelmente piores. Como as equações são do mesmo tipo e o medidor de pressão diferencial foi o mesmo nos dois casos, pode-se postular que a incerteza menor nos dados da vazão medida  $Q_M$  foi conseguida, em parte, devido às facilidades de tratamento de sinal presentes no transmissor de pressão, como as tabelas de correção das leituras e a filtragem e média móvel providas pela constante de tempo relativamente alta (2 segundos) incluída no processamento do sinal.

Pode-se concluir que o software de tratamento dos dados de pressão diferencial instantânea é de importância fundamental na obtenção de dados de vazão com boa acurácia. Assim, os dados das regressões efetuadas entre as deflexões e a vazão são mais úteis para examinar os efeitos de assimetria no perfil de velocidades do que para quantificar os erros esperados na utilização normal do sistema medidor, melhor representados pela leitura de  $Q_M$ .

A Tabela 3 permite concluir que a curva de ajuste exponencial, com coeficientes variáveis, foi a que melhor se adaptou aos dados de deflexão proporcionados pelas sondas. Os coeficientes de correlação dos ajustes com  $b$  variável foram melhores, assim como foram menores os desvios padrão, em relação aos obtidos com a equação quadrática ( $b = 0,5$ ).

O ajuste de equações quadráticas baseia-se no valor teórico de 0,5 previsto para medidores do tipo Pitot estático, ou seja, com determinação precisa da pressão de estagnação e da pressão estática do escoamento. As sondas estudadas possuem orifícios de diâmetro relativamente grande, além de permitirem a ocorrência de circulação de água, pelo interior da haste da sonda, entre dois furos situados em locais de diferentes velocidades (Kurz, 1996). Esses fatores podem levar a que as pressões de montante sejam diferentes das pressões de estagnação. Além disso as sondas estudadas não possuem tomadas de pressão

estática e sim da subpressão na esteira a jusante da haste.

Apesar das ponderações em contrário do parágrafo anterior, os valores dos expoentes que produziram o melhor ajuste aos dados experimentais, apresentados na Tabela 3, situaram-se entre 0,45 e 0,49, valores suficientemente próximos do valor teórico para justificar a utilização das equações com expoente constante  $b = 0,5$ . Essa decisão se justifica, em primeiro lugar, porque já existem condicionadores de sinal padrão, de utilização corrente na indústria, com a equação quadrática incorporada, facilitando grandemente a montagem de conjuntos de medição eficientes e de baixo custo.

Além disso, a utilização do coeficiente constante  $b = 0,5$  justifica-se porque o ajuste da equação em campo pode ser efetuado a partir de uma única leitura de vazão com o tubo de Pitot como padrão, simplificando grandemente os procedimentos necessários para colocar o medidor em serviço. Com o tempo, e de acordo com as disponibilidades operacionais, novos valores podem ser acrescentados a uma tabela de correção disponibilizada por software, melhorando o valor das estimativas de vazão proporcionadas pelo medidor. No caso do transmissor/condicionador utilizado neste trabalho, utilizou-se para isso facilidades presentes em firmware.

Considera-se agora o caso da necessidade de utilização do medidor em condições hidráulicas desfavoráveis, seja por modificações no perfil de velocidades, que podem ocorrer ao longo do tempo de operação, seja por impossibilidade física ou econômica de instalação em condições ótimas. Essa situação é analisada com base na resposta das duas hastes às modificações do perfil, refletidas nas diferenças entre as equações de ajuste obtidas entre a deflexão e a vazão. A equação utilizada na comparação foi do tipo quadrático, com base nas considerações já apresentadas sobre a conveniência de sua utilização.

Tanto na Tabela 4 como na Figura 6, observa-se que a curva de calibragem da haste com apenas 1 furo variou acentuadamente quando o perfil passou de simétrico para assimétrico, indicando que seriam obtidos valores bem discrepantes se uma calibragem em perfil de velocidade simétrico fosse utilizada em condições de perfil assimétrico.

No caso em que o medidor foi montado com a haste de 7 furos, pode-se observar, na Tabela 4 e na Figura 7, que as equações que proporcionaram o melhor ajuste aos dados experimentais são muito semelhantes. Com base nesses resultados, pode-se argumentar, novamente, que a haste de 7 furos apresenta uma menor sensibilidade às variações do perfil de velocidades.

Com os resultados das regressões na Tabela 4 é possível simular um caso limite em que o medidor tenha sido fornecido com uma equação de calibração válida para perfil simétrico e que, inadvertidamente, seja utilizado

em condições de assimetria de perfil, sem nova aferição em campo, como seria desejável. A figura 5 mostra que a utilização de uma haste de apenas um furo no medidor poderia gerar erros intoleráveis. Por outro lado, a Figura 7 permite a previsão de que uma haste de 7 furos teria um comportamento ainda aceitável. Para o caso estudado, especificamente, a aplicação da equação de calibragem obtida no *Tap2* à situação existente no *Tap1* conduziu a um erro médio praticamente igual, de cerca de 9%.

Não se encontra na literatura um equacionamento eficiente que relacione as diferenças de velocidade no perfil à pressão coletada pela haste de múltiplos furos. Sabe-se que ocorre uma circulação interna na haste (Kurz, 1996) que proporcionaria uma capacidade de encontrar automaticamente uma pressão correspondente à vazão média (Livelli, 1997, Bolton, 1996). A maior parte das referências alude a uma espécie de pressão média, sem quantificação mais rigorosa.

Morris (1993, pg.327), por exemplo, considera que a sonda de múltiplas tomadas provê apenas uma medição aproximada da vazão média do tubo. Doebelin (1990) afirma que a câmara comum proporcionada pela haste produz uma pressão de “impacto” única, relacionada às pressões totais, e uma pressão “estática” também única. Doebelin cita também a presença do “tubo de interpolação” no interior da câmara única de pressão do medidor patenteado *annubar*, para capturar a pressão num ponto “ótimo” (aspas no original). É possível que essa lacuna seja responsável pela falta de confiança na utilização desse tipo de sensor em perfis com alguma assimetria.

O bom resultado da haste de 7 furos nas condições específicas analisadas não garante, portanto, que múltiplos furos possam efetivamente corrigir assimetrias de perfil em quaisquer condições. O perfil na seção do *Tap1* (v. fig.3) pode ter favorecido este desempenho, uma vez que as maiores velocidades encontram-se próximas ao ponto de leitura das pressões, na extremidade superior do tubo.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O acompanhamento dos diversos medidores instalados em condições reais de serviço, no monitoramento contínuo de redes de abastecimento, mostrou ser o sistema de medição proposto neste trabalho um instrumento com bom desempenho operacional, em condições de satisfazer as demandas dos sistemas públicos de abastecimento de água tratada.

A incerteza média obtida em condições favoráveis de perfil de velocidades foi da ordem de 2% da leitura, qualificando o medidor como alternativa para soluções patenteadas, como as hastes “Annubar”, ou mais caras, como os medidores de inserção com múltiplos

sensores magnéticos. Além disso, a tecnologia simples de construção do sensor, aliada ao emprego de instrumentação dedicada de amplo uso na indústria, torna viável a criação e manutenção desses medidores pelos próprios usuários.

Para obtenção de bons resultados é fundamental obter uma boa filtragem dos dados instantâneos de pressão diferencial gerados pela sonda. Esse requisito não é obstáculo ao emprego do medidor porque pode ser adotada uma relação quadrática entre deflexão e vazão. Com isso podem ser utilizadas rotinas já existentes nos condicionadores dedicados a elementos sensores deprimogênicos, amplamente difundidos no mercado.

Em comparação com a haste de apenas 1 furo para tomada de pressão, a haste de 7 furos mostrou-se menos sensível a variações no perfil de velocidades, o que representa uma importante segurança na operação de longo prazo.

Finalmente, pode-se afirmar que o uso da haste de 7 furos no sistema de medição permitiu compensar de forma aceitável os erros causados pela assimetria dos perfis de velocidade investigados. Entretanto, essa afirmação não pode ser generalizada, precisando ser comprovada por meio do desenvolvimento de modelos matemáticos que explicitem a resposta do sensor, uma questão ainda em aberto na literatura.

#### REFERÊNCIAS CITADAS

1. AWWA - American Water Works Association. **Water treatment plant design**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
2. BOLTON, W. **Instrumentation and measurement pocket book**. 3.ed. Manchester: Division of Reed Educational and Professional Publishing, 1996.
3. DOEBELIN, E. O. **Measurement systems application and design**. 4.ed. California: McGraw-Hill, 1990.
4. DOIRON, T.; STOUP, J. Uncertainty and dimensional calibrations. **Journal of Research of the Institute of Standards and Technology**. v. 102, n. 6, p. 647 – 676, 1997. Disponível em: <http://emtoolbox.nist.gov/Publications/NISTJResNov-Dec97-102-6.pdf>. Acesso em: 06 de maio de 2008.
5. KURZ, J. **Effect of internal flow circulation on self-averaging pitot tube arrays**. Monterey, CA: Kurz Instruments, Inc., 1996.
6. LIVELLI, G. **Fundamentals of Multi-Port Averaging Pitot Tubes in Natural Gas Measurement**. Texas: Dieterich Standard, Inc., 1997.
7. MORRIS, A. S. **Principles of measurement and instrumentation**. 2.ed. Great Britain: Redwood Books, 1993.
8. 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).
9. SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Pitometria: aplicada a pesquisa de vazamentos**. São Paulo: Sabesp, 1984. 110p. (Apostila)
10. UPP, E.L. **Fluid flow measurement: a practical guide to accurate flow measurement**. Houston: Gulf Publishing, 1993. 178p.