



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Departamento de Engenharia Civil

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

AVALIAÇÃO DE MEDIDORES COM MÚLTIPLAS TOMADAS DE PRESSÃO NA MACROMEDIÇÃO EM SISTEMAS DE ÁGUA

NICANOR ALENCAR CAMAPUM FILHO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil - ênfase em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Milton Dall'Aglio Sobrinho

ILHA SOLTEIRA - SP
Novembro - 2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

C172a

Camapum Filho, Nicanor Alencar.

Avaliação de medidores com múltiplas tomadas de pressão na macromedição em sistemas de água / Nicanor Alencar Camapum Filho. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2007
128 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2007

Orientador: Milton Dall'Aglio Sobrinho

Bibliografia: p. 89-92

1. Medidor de vazão. 2. Pressão diferencial. 3. Medidor de inserção. 4. Medidor multífuos.

Aos meus pais, Nicanor Camapum e Odete Camapum (in memoriam), pelo amor e sacrifícios, aos meus filhos Rodrigo, Bárbara, Leandro e a Maria de Fátima, minha esposa pelo amor e compreensão com que se tornaram personagens ativos e passivos da minha história de luta e participando efetivamente da conquista de mais este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram de forma carinhosa, paciente, amiga, que me deram esperança, elevaram minha auto-estima, indicaram caminhos, esclareceram dúvidas, enfim agiram de forma fundamental para a construção deste trabalho.

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo, sem Ele seria impossível concretizar qualquer sonho ou vencer algum obstáculo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Milton Dall'Aglio Sobrinho, que foi uma pessoa chave para a conclusão desta etapa, tendo em vista o tempo que despendia para elucidar minhas dúvidas, corrigir meus erros e me guiar pelo caminho do sucesso, apoiando e depositando toda sua confiança em mim. Obrigado querido amigo e professor.

Aos amigos da Sabesp, o meu sincero agradecimento, por acompanharem o meu trabalho, incentivando-me com palavras amigas quando já me encontrava cansado, impulsionando-me de forma positiva; que observaram o meu esforço do dia a dia mesmo com a correria do cotidiano, permitindo assim o cumprimento de mais este objetivo.

Agradeço também a todos os professores da UNESP que de alguma maneira direta ou indireta me ajudaram e acreditaram na conclusão deste projeto.

Por fim, agradeço de forma especial, aos companheiros Décio, Gilmar e Robinson que participaram de todas as etapas desta minha caminhada, discutindo, orientando-me e de forma carinhosa dando todo o suporte que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT.....	IX
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	5
3. OBJETIVO.....	6
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
4.1. PEQUENO HISTÓRICO DA MEDIÇÃO DE VAZÃO.....	7
4.2. PRINCIPAIS TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO UTILIZADOS EM SISTEMAS DE ÁGUA.....	12
4.2.1. MEDIDORES TIPO VENTURI.....	13
4.2.2. MEDIDORES TIPO TURBINA.....	15
4.2.3. MEDIDORES TIPO PITOT DE INTEGRAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES.....	18
4.2.4. MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS.....	21
4.2.4.a. MEDIDORES COM BOBINA DE INDUÇÃO EXTERNA.....	21

4.2.4.b. MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS DE INSERÇÃO COM UM SENSOR.....	23
4.2.4.c. MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS DE INSERÇÃO COM MÚLTIPLOS SENSORES.....	25
4.2.5. MEDIDORES ULTRASSÔNICOS.....	28
4.2.5.a. MEDIDORES DE TEMPO DE TRÂNSITO.....	28
4.2.5.b. MEDIDORES DE EFEITO DOPPLER.....	30
4.3. PERFIS DE VELOCIDADE E TÉCNICAS DE PITOMETRIA.....	31
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
5.1. SONDAS MULTI-FUROS E MÉTODO DE INSTALAÇÃO.....	35
5.2. LOCAIS DE INSTALAÇÃO DOS MEDIDORES.....	40
5.3. METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DAS SONDAS NA INSTALAÇÃO DO ALTO ETA.....	43
5.4. METODOLOGIA DE AJUSTE DOS MEDIDORES INSTALADOS EM CAMPO.....	45
5.5. ANÁLISE DOS DADOS DE CALIBRAÇÃO.....	45
6. RESULTADOS.....	49
6.1. AVALIAÇÃO DO EFEITO DE MÚLTIPLOS FUROS.....	49
6.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	65

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO.....	75
8. CONCLUSÃO.....	86
..9.REFERÊNCIAS	89
ANEXOS	93
ANEXO 1(DESENHO DO TAP)	94
ANEXO 2 (FOTOS)	96
..ANEXO 3 (CERTIF. DE CALIBRAÇÃO.DO PADRÃO DE REFERÊNCIA)...	107
ANEXO 4 (CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL “A” Nº 230670-06).....	111
ANEXO 5 (CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TRASNDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL “B” Nº 230675-06)	113
ANEXO 6 (CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TRASNDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL “C” Nº 230673-06)	115
ANEXO 7 (CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TRASNDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL “D” Nº 196267-04)	117
ANEXO 8 (MODELO DE MAPEAMENTO DE PERF. DE VELOCIDADE)....	119
ANEXO 9 (DETALHE CONSTRUTIVO DA SONDA).....	121
ANEXO 10 (PLANTA DA ETA – LOCAL DOS TESTES)	127

RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de avaliar os medidores de vazão com uma ou múltiplas tomadas de pressão em sistemas de água. Esses medidores de vazão são de fácil construção, utilizando materiais de baixo custo, podem ser instalados em locais que apresentem perfis de velocidades axialmente assimétricos em decorrência da existência de singularidades e/ou incrustações internas.

Este estudo também foi idealizado para auxiliar os programas de redução de perdas físicas de água, uma vez que existe uma demanda reprimida na instalação de medidores de vazão em redes públicas de abastecimento.

O trabalho foi desenvolvido em escala real nas instalações da ETA de Presidente Prudente-SP que abastece a zona de distribuição denominada de Alto ETA. Como padrão de medição foi utilizado um tubo de Pitot do tipo Cole, calibrado em túnel de vento pelo IPT.

Além da aferição em diversos perfis de velocidade, medidores de múltiplos furos foram instalados em vários locais da rede, o que proporcionou uma verificação do comportamento do medidor em relação à variação do tipo de materiais e diâmetros das redes de abastecimento e uma avaliação geral do seu emprego em condições reais de uso em sistemas de abastecimento público.

Os resultados demonstram que o medidor multifuros foi menos sensível à variação do perfil de velocidades, ou seja, a utilização da curva de calibragem obtida em condições ideais numa situação de perfil assimétrico levou a erros de medição menores que os obtidos com medidor de tomada única.

A possibilidade de contar com um medidor de vazão adequado às condições brasileiras, de baixo custo e facilidade de construção, abre perspectivas para alavancar os programas de redução de perdas físicas de água, uma vez que

existe uma grande demanda reprimida na instalação de medidores de vazão em redes de abastecimento público.

PALAVRAS-CHAVE: Medidor de vazão, Pressão diferencial, Medidor de inserção, Medidor Multifuros.

ABSTRACT

This work had the objective of evaluating the flow meters with one or multiple orifices in water supply systems.

Those flow meters are of easy construction, using inexpensive materials, and can be installed in places that present asymmetric velocity profiles as a consequence the existence of singularities and internal incrustations.

This study was also conceived to aid the programs of reduction of physical losses of water, since a repressed demand for flow meters exists in water distribution systems.

The work was developed in real scale in the Water Treatment Station - ETA of Presidente Prudente city-SP, that provisions the zone of distribution denominated High ETA. The measurement standard was a Pitot-Cole meter calibrated in wind tunnel by IPT.

Besides calibration in several velocity profiles, meters of multiple orifices were installed at several places of the net, that provided a verification of the behavior of the meter related to the variation of the type of material and diameters of water distribution systems and a general evaluation of its employment in real conditions of use in public supply systems.

The results demonstrate that the multi-port meter was less sensitive to the variation of the velocity profiles, in other words, the use of the calibration curve obtained in ideal conditions in a situation of asymmetric velocity profiles, led to smaller measurement errors than that obtained with a meter of only one orifice.

The possibility to count on a flow meter adequate to the Brazilian conditions, inexpensive and easily constructed, opens perspectives for support the

programs of reduction of physical losses of water, since there is a great unsatisfied demand for flow meters in water public supply systems.

KEY-WORDS: Flow meter, Pressure differential meter, Insertion meter, Multi-Port Averaging Pitot Tube, Multi-orifices meter.

1. INTRODUÇÃO

O homem sempre necessitou medir quantidades de líquidos, seja para transferir de um recipiente para outro, seja para venda ou estimativa de reservas. O transporte de líquidos em recipientes com dimensões conhecidas permite trabalhar com boa acurácia; porém quando se trata de transporte de líquidos, através de dutos, a medição da vazão passa a ter maior nível de incerteza.

Na história, grandes nomes marcaram suas contribuições para o desenvolvimento das medições de vazão. Possivelmente a primeira contribuição foi dada por Leonardo da Vinci em 1502 que observando um rio percebeu que a quantidade de água por unidade de tempo que escoava era a mesma em qualquer parte deste, independente da largura, profundidade, inclinação e outros.

Porém não se pode garantir exatidão plena nos volumes transportados em dutos, dizemos então que o volume transportado possui certo grau de incerteza. O que se tem feito é reduzir este grau de incerteza que em alguns casos pode representar prejuízos de grande monta.

Com o surgimento da era industrial, o trabalho de pesquisadores como Bernoulli, Pitot e outros e, em conseqüência do constante desenvolvimento da tecnologia, da competição entre fabricantes de instrumentos e das exigências crescentes das indústrias de processo, a instrumentação industrial enriqueceu-se, de inúmeras inovações, componentes, produtos e sistemas.

A medição de vazão, por exemplo, ganhou em precisão, confiabilidade e versatilidade, podendo ser aplicada a condições de serviço cada vez mais diversificadas. Em contrapartida, a variedade dos tipos e modelos de instrumentos de medição de vazão que foram recentemente desenvolvidos, 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.

A escolha do sistema de medição mais adequado para determinada aplicação é freqüentemente um problema para o engenheiro de instrumentação, embaraçado diante de muitas alternativas. Por outro lado, não é raro que se tenha tendência a abandonar a corrida sem fim de atualização tecnológica, por não dispor de informações, senão através de publicidades imprecisas e pouco técnicas.

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

As técnicas de medição de vazão têm evoluído ao longo dos anos em resposta à demanda para medir novos produtos, medição de produtos sob novas condições de fluxo e maiores exigências de precisão; porém o ideal seria que todos estes medidores fossem calibrados periodicamente com o tubo Pitot.

Diante destes aspectos apresentados propõe-se estudar um medidor de vazão que se aproxime do grau de incerteza do Tubo Pitot, que apresente um baixo custo de fabricação e manutenção, além de atender grandes diâmetros e que seja de fácil instalação.

O medidor escolhido neste estudo é do tipo insertivo, que não necessita de seccionamento da tubulação para sua instalação, tornando-se desta forma um aparelho de montagem prática e simples.

Mais adiante será mostrado que os valores apresentados pelo aparelho proposto são grandezas transferidas do Tubo Pitot, procurando conservar a mesma qualidade deste.

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 do fluxo (vide anexo 9). Isto foi possível, com a introdução de poucas modificações, nas instalações da ETA de Presidente Prudente-SP que abastece a zona de distribuição denominada de Alto ETA.

Apesar deste trabalho ter como objetivo principal a comparação entre sondas com 1 tomada de pressão e com sete tomadas em situações onde o perfil de velocidade possa ser axialmente simétrico ou não, 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 locais 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 distintos - Alto da Boa Vista e Jd. Bongiovani, sendo as duas redes com diâmetros de 250mm em fibrocimento, uma pela Rua Campestre e outra pela Rua Santa Maria, no Reservatório da Vila Formosa 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, para abastecimento dos bairros Novo Bongiovani, Jd. Maracanã, Cobral, Pinheiros e Panorama, no Reservatório da Cohab no Município de Presidente Prudente.

No município de Presidente Prudente estas instalações foram também utilizadas para estudos de perdas físicas de água.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente um problema que se verifica nas medições de vazão são os desvios apresentados nas leituras e se busca construir medidores que proporcionem maior precisão nos volumes de água transportados em tubulações. Além deste problema existe também um grande déficit de medidores de vazão em redes públicas de abastecimento, o que dificulta o desenvolvimento do programa de pesquisa e controle de perdas de água.

A grande dificuldade para utilização dos medidores disponíveis no mercado é que esses medidores são normalmente caros, principalmente para grandes diâmetros, são de difícil instalação, necessitando da construção de acessórios que possuam os diâmetros internos semelhantes aos dos medidores.

Um sistema de medição de vazões para sistemas públicos de abastecimento de água deve satisfazer às seguintes demandas:

- Baixo custo de implantação;
- Facilidade de manutenção;
- Desempenho operacional consistente ao longo do tempo;
- Baixa perda de carga na tubulação a ser medida;
- Possibilidade de utilização em controle de processos (4 a 20mA);
- Leituras diretas de vazão;
- Registros de volumes acumulados;
- Confiabilidade metrológica;
- Condições de atuar como controladores de válvulas, bombas dosadoras, conversores de frequência etc.

3. OBJETIVO

O objetivo do trabalho foi testar o desempenho do medidor de múltiplos furos em condições de perfis de velocidade axialmente simétricos e assimétricos.

Além disso, o trabalho teve como objetivo avaliar o medidor de múltiplos furos acoplado a um medidor de pressões diferenciais disponível comercialmente, compondo sistema de medição de vazão, que foi utilizado em condições operacionais normais de sistemas de abastecimento público.

O trabalho também vislumbrou formular um modelo hidráulico que explicasse o fluxo no interior das hastes do medidor multifuros.

O trabalho teve como objetivo também, desenvolver técnicas de construção do medidor multifuros visando tornar sua instalação mais prática e com menor custo.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Pequeno histórico da medição de vazão

Segundo Taira (2003), o engenheiro francês Henri Pitot no ano de 1732 descobriu através de experimentos que a coluna líquida (deflexão) medida com o tubo Pitot é proporcional ao quadrado da velocidade do fluido, porém a primeira patente do tubo Pitot para utilização em conduto fechado foi concedida a Henry Fladd em 1889.

A idéia desenvolvida por Pitot, de que a velocidade do fluido escoado é proporcional à raiz quadrada da altura de uma coluna líquida, foi utilizada por Darcy, engenheiro francês, 125 anos depois em medições de escoamento em canais abertos, conforme figura 1.



Figura 1 – Experimento de Darcy (Taira, 2003)

A partir de 1732 houve muitos progressos nas técnicas de medição de vazão; dentre os medidores modernos, estão: o Tubo Venturi, medidores eletromagnéticos, medidores do tipo turbina, medidores ultra-sônicos e a laser; porém esses medidores depois de instalados nos sistemas carecem de

calibrações periódicas com o Tubo Pitot que é o medidor de vazão instantânea mais confiável e que apresenta, se bem calibrado, um grau de incerteza da ordem de $\pm 4\%$ (TAIRA, 2003).

Segundo Upp (1993), a cerca de 4000 anos atrás, os Romanos mediam fluxo de água de seus aquedutos para distribuição para cada casa. Mais cedo ainda, os Chineses mediam fluxo de água salgada destinada a seus recipientes de produção de sal. Segundo Delmée (1983), "existem vestígios deste tipo de medição desde os tempos da civilização egípcia (canais de medição para irrigação), e referências em uma obra de Frontinus, no ano de 90 de nossa era". Em cada um destes casos, o controle sobre os processos foi a primeira razão para as medições.

Segundo Delmée (1983), Henri Pitot publicou em 1732 um artigo sobre o medidor que ele havia desenvolvido e em 1797, Venturi publicou os resultados dos seus trabalhos sobre os princípios do aparelho que costumamos chamar hoje "tubo de Venturi".

Nicolau e Guths (1988), descrevem que o princípio de funcionamento dos medidores diferenciais de pressão, baseia-se no uso de uma mudança de área de escoamento através de redução de diâmetro ou de um obstáculo, ou ainda através de uma mudança na direção do escoamento. Essas mudanças provocam uma aceleração local do escoamento, alterando a velocidade e, em conseqüência, a pressão local.

Enquanto que Nicolau e Guths (1988), mostram o princípio de funcionamento dos medidores diferenciais de pressão, que se baseia na mudança de área de escoamento ou de um obstáculo, pode-se citar também o princípio de Pitot.

Este princípio consiste em medir a vazão com base na velocidade detectada em um ponto da tubulação, ou seja, consiste em medir duas pressões, sendo

uma a pressão total exercida pelo fluido na tubulação e outra a pressão estática do fluido, medida junto à geratriz da tubulação.

A variação de pressão nos dois casos é proporcional ao quadrado da vazão. São medidores bastante conhecidos, normalizados e de baixo custo. Estima-se que abranjam 50% de utilização na medição de vazão de líquidos (NICOLAU; GUTHS, 1988).

Segundo Taira (2003), Nos Estados Unidos em 1875, HF. Mills foi provavelmente o primeiro a utilizar industrialmente o tubo de Pitot. A primeira patente no uso do tubo de Pitot para medida de velocidade em conduto fechado foi concedida a Henry Fladd, em St. Louis, em 1889.

Em 1896, Edward Cole desenvolveu um tubo de Pitot reversível (dois *tips* para medida de pressão) conforme mostra figura 2, para trabalhar em condutos pressurizados, e em 1935 publicou um artigo onde descreve uma metodologia de mapeamento do perfil de velocidade e método de integração figura 20



Figura 2 – Tubo de Pitot do tipo Cole

Cole também enfatizou em seu trabalho a necessidade de calibração do tubo de Pitot desenvolvido por ele, tendo realizado ensaios numa tubulação de 12 polegadas em tanque circular e por comparação com um tubo Venturi de 16 polegadas os resultados mostraram que existe uma correção que deve ser

aplicada à equação desenvolvida por Pitot, cujo valor pode variar de 0,84 a 0,89. (TAIRA, 2003), conforme figura 21.

Mais de 100 anos se passaram desde os desenvolvimentos realizados por Cole, e os mesmos ainda são amplamente utilizados nas empresas de saneamento, sendo mantidas até então as formas geométricas e dimensionais e a mesma metodologia de cálculo. Mais recentemente incorporou-se ao processo medidores de pressão eletrônicos e sistemas de aquisição de dados para facilitar o processo de cálculo.

Uma frase de Cole no final do seu artigo de 1935 deve ser mencionada: “...*In the hands of trained and experienced men this device is a useful and accurate instrument*” (TAIRA, 2003).

Ainda segundo Taira (2003), as equações básicas do tubo de Pitot Cole para velocidade e vazão são:

$$V = C \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot (x - 1)} \quad \text{e} \quad V = K \cdot \sqrt{h}$$

Onde

V = Velocidade do escoamento

g = Aceleração da gravidade local

h = Deflexão provocada em uma coluna de água

x = Densidade relativa do fluido manométrico

K = Fator considerado constante e próprio de cada medidor.

$$Q = FV.Vc.Cm.Sc.Ct.Cd$$

Onde

Q = Vazão obtida com o tubo de Pitot

Vc = Velocidade central

FV = Fator de velocidade

S = Área da seção transversal interna da tubulação

Cm = Coeficiente de correção da densidade do fluido manométrico

Ct = Coeficiente de correção devido à projeção do registro de derivação

Cd = Coeficiente de correção do diâmetro do tubo

4.2. Principais tipos de medidores de vazão utilizados em sistemas de água

O objetivo deste item é apresentar uma visão resumida dos principais tipos de medidores de vazão disponíveis para utilização em sistemas públicos de abastecimento de água.

Embora seja um assunto amplamente coberto pelos manuais gerais de instrumentação, como por exemplo Doebelin (1980), Benedict (1976), Yang (1989), Ambrosius et al. (1966), Bentley (1995), bem como de publicações específicas na área (AWWA, 1990), acredita-se que as informações deste item serão úteis como consulta inicial aos interessados, agregando ao contexto as principais vantagens e desvantagens, problemas operacionais e de adaptação às condições usualmente vigentes nos sistemas Brasileiros.

Existe um grande número de medidores de vazão que podem ser classificados por grupos que se baseiam nos seus princípios de funcionamento. O elevado número de princípios de funcionamento certamente surgiu de grandes esforços para busca de atender as mais amplas possibilidades de aplicações e o conjunto de medição de cada princípio, é, via de regra, composto por dois elementos, o elemento primário e o elemento secundário.

Segundo Delmée (1983), os elementos primários se encontram em contato com o fluido, resultando em alguma forma de interação. Sua função é transformar a vazão em outra grandeza física facilmente mensurável. Assim, uma placa de orifício transforma a vazão em pressão diferencial, um sensor ultrassônico em frequência elétrica, etc.

Os elementos secundários, por sua vez, transformam esta grandeza obtida do elemento primário em informação adequada para leitura local ou transmissão a distância do valor correspondente à vazão.

4.2.1 Medidores tipo Venturi

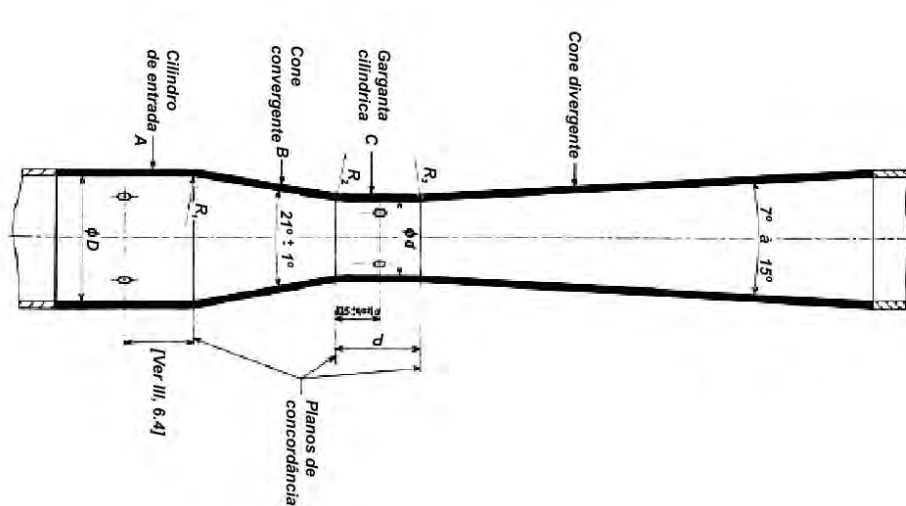


Figura 3 – Dimensões básicas de um tubo Venturi clássico (DELMÉE, 1989)



Figura 4 – Tubo de Venturi (REDDY-BUFFALOES PUMP COMPANY, 2007)

Segundo Delmée (1983), os sistemas de medição usando uma configuração geométrica do tipo convergente-divergente foram os primeiros a serem desenvolvidos para aplicações industriais. Upp (1993), assim como Delmée (1983), situam o trabalho de Clemens Herschel, em 1887, como a primeira aplicação industrial do princípio de Venturi.

O tubo de Venturi clássico apresenta um perfil conforme mostram as figuras 3 e 4. A diferença fundamental entre este elemento primário de vazão e a placa de orifício é que, no primeiro, a veia fluida acompanha constantemente as paredes do tubo, ao passo que, no segundo, existe um “colchão” de fluido, entre as paredes do tubo e a veia fluida, a jusante da placa, formado por redemoinhos.

No tubo de Venturi, existem três partes importantes: o cone de entrada, destinado a aumentar progressivamente a velocidade do fluido; a parte intermediária cilíndrica, onde se faz a medição de baixa pressão; e o cone de saída, que diminui progressivamente a velocidade até ser igual à entrada.

O interesse principal do tubo de Venturi em relação à placa de orifício é a baixa perda de carga residual que ele produz, o que torna seu uso interessante para instalações industriais. Entretanto, eles são maiores e mais pesados comparados com outros medidores; isto dificulta a instalação e inspeção dos mesmos. Possuem a vantagem de permitir a medição em líquidos com sólidos em suspensão.

Segundo Morris (1993), o tubo de Venturi é um instrumento caro mas oferece uma boa precisão (aproximadamente $\pm 1\%$) e cria uma perda permanente no sistema de apenas 10 a 15% da energia hidráulica (pressão). Doebelin (1990) lembra que o maior custo inicial em relação às placas de orifício pode ser compensado pela redução do custo operacional que resulta das baixas perdas de carga.

Segundo Upp (1993), medidores de baixa perda de carga são liderados nos Estados Unidos pelo tubo de Venturi que é usado para líquido, gás e vapor em tubos com número de Reynolds acima de 100.000.

4.2.2 Medidores tipo turbina

Segundo Upp (1993), medidores tipo turbina são utilizados amplamente e com sucesso para medições de líquidos e gases. A figura 5 mostra um esquema de medidor com rotor que ocupa toda a seção do tubo. Além desse tipo de montagem, existem medidores do tipo de inserção que operam com o mesmo princípio.

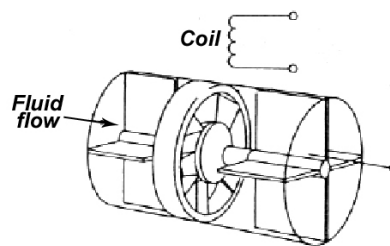


Figura 5 – Medidor tipo turbina (BOLTON, 1996)



Figura 6 - Medidor de vazão tipo turbina (TECHMETER, 2007)



Figura 7 - Medidor de vazão turbina de inserção (INCONTROL, 2007)

Os medidores de vazão em dutos fechados chamados turbinas (figura 6) têm este nome derivado do elemento interno rotativo, que é de fato, a peça principal do instrumento Delmée (1983). Segundo Ambrosius et al (1966), o medidor opera mais como um anemômetro convencional. O fluido escoando através do medidor rompe a inércia do rotor e este toma rapidamente a velocidade proporcional do fluido. Doebelin (1990) considera que, saindo do atrito estático e mantendo outras perdas no mínimo, pode-se dizer que a velocidade da turbina varia linearmente com a vazão.

O condicionamento do sinal tem início com a detecção da velocidade de rotação do rotor. Delmée (1983) cita dois sistemas principais de medição da rotação: o sistema magnético e o de rádio frequência. Morris (1993) registra ainda equipamentos em que fibras óticas são usadas para contar as rotações por meio de reflexão da luz na passagem das lâminas do rotor pelo sensor.

O sistema magnético usa um coletor magnético de proximidades, composto de um ímã permanente e de uma bobina sensora. O fluxo magnético na bobina é detectado a cada passagem do ímã, gerando um sinal que pode ser condicionado na forma de pulsos de tensão (DOEBELIN, 1990). Este tipo de sensor é descrito também por Bolton (1996) que no entanto citou sua aplicação apenas a rotores com lâminas metálicas imantadas.

O sensor do sistema de rádio frequência utiliza uma bobina alimentada com corrente alternada. Esse sinal é modulado em frequência pela passagem das pás do rotor pelo campo magnético criado pela bobina. Um esquema da

modulação e um diagrama de blocos do condicionador de sinais necessário é apresentado por Delmèe (1983), p. 386.

A AWWA (1998) cita faixas de erro típicas de $\pm 1,5\%$ da leitura, com alcance das leituras variando entre a relação 40:1 até 100:1 entre a máxima e mínima leituras da faixa. Cita ainda limites de aplicação prática em diâmetros de até 400mm, para turbinas ocupando integralmente a seção do tubo.

Os medidores de turbina também podem ser do tipo de inserção, conforme figura 7. A AWWA (1998) cita aplicações desse tipo de medidor em tubos de até 3m de diâmetro, com erros de $\pm 2\%$ e faixas de medição variando entre as relações 6:1 a 8:1 entre as leituras máxima e mínima da faixa para esse tipo de medidor.

4.2.3 Medidores tipo Pitot de integração do perfil de velocidades

Esses medidores, chamados genericamente de "*averaging Pitot*" na literatura internacional, utilizam várias tomadas de pressão distribuídas ao longo da seção transversal do tubo. Uma versão desses medidores muito conhecida é a comercializada pela Rosemount sob a marca "*Annubar*". Um esquema dos medidores *annubar* em sua versão comercial original, com 4 tomadas de pressão, é apresentado na figura 8, demonstrando as principais características dos medidores de múltiplas tomadas de pressão. A sonda proposta neste trabalho pertence a esta família de medidores.

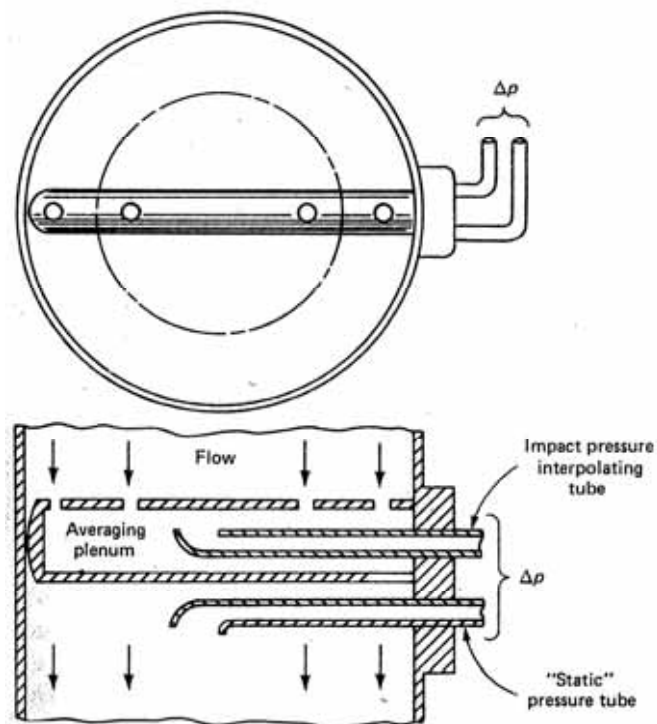


Figura 8 – Esquema dos medidores tipo *annubar* Doebelin (1990)

Segundo Taíra (2003) esses medidores são conhecidos também como "Sonda 4" e "Pitot proporcional", dentre outros.

Doebelin (1990) comenta que a utilização de uma sonda fixa com várias tomadas sensoras de pressão alimentando uma câmara comum proporciona um medidor que pode ser calibrado na prática. A câmara comum proporciona, segundo Doebelin, uma pressão de "impacto" única, relacionada às pressões totais, e uma pressão "estática" também única. A raiz quadrada da diferença entre essas pressões pode ser relacionada por calibração com a vazão no tubo. Doebelin cita também a presença do "tubo de interpolação" situado no interior da câmara única de pressão, empregado no medidor *annubar* para capturar a pressão num ponto "ótimo" em relação às quatro tomadas de pressão. Devido a esse desconhecimento sobre a relação clara entre as pressões existentes e a pressão única medida, Morris (1993), pg. 327 considera que a sonda de múltiplas tomadas provê apenas uma medição aproximada da vazão média do tubo.

Posteriormente os medidores *annubar* começaram a ser comercializados com novo desenho da haste e com duas fendas sensoras de pressão, conforme demonstra a ilustração da figura 9. Segundo o fabricante, o novo desenho da haste e das fendas frontais melhora a acurácia e a repetibilidade do medidor, reduzindo o erro a $\pm 0.75\%$.



Figura 9 – Medidor *annubar* 485 (ROSEMOUNT, 2007)

As vantagens deste tipo de medidor, segundo Taíra (2003) são: baixo custo de instalação, baixa perda de carga, disponibilidade para diâmetros de 1" a 80" e possibilidade de operação com líquido, gás ou vapor de água. Suas desvantagens, segundo Taíra são: medidor altamente suscetível ao perfil de velocidades, exige trechos retos: >10 diâmetros a montante e > 5 diâmetros a jusante, exatidão pobre (da ordem de 2%), faixa útil de medição limitada, depende da qualidade da medida de pressão e perda de exatidão com o tempo (incrustações e risco de entupimento).

É interessante observar que uma característica desejável na concepção do medidor, ou seja, sua sensibilidade às variações de velocidade no perfil, é apresentada por Taíra (2003) como uma das desvantagens do medidor. Possivelmente essa opinião decorre da não existência de uma relação clara entre as pressões determinadas pelo medidor e as pressões dinâmica e estática geradas num perfil de velocidades qualquer.

Essa deficiência do medidor é realçada por Doebelin (1990) ao criar os termos pressão única de "impacto" e pressão "estática" para se referir às pressões geradas pelo medidor de múltiplas tomadas.

Uma alternativa comercial aos medidores de tomadas múltiplas de pressão é apresentada pela Kurtz Instruments (1987), com múltiplos sensores térmicos de velocidade, para aplicação em gases. Evolução no mesmo sentido é representada pela sonda eletromagnética de múltiplos sensores de velocidade.

Essas propostas, ao medir diretamente a velocidade no perfil em múltiplas seções anulares, elimina as incertezas do equacionamento introduzidas pela unificação de pressões produzida nas sondas de múltiplas tomadas de pressão.

4.2.4 Medidores eletromagnéticos

a) medidores com bobina de indução eletromagnética externa

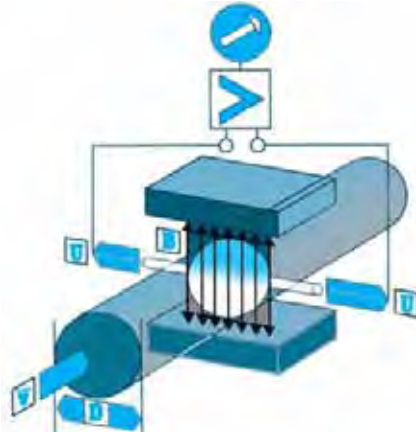


Figura 10 – Medidor eletromagnético de vazão (CONAUT, 2007)



Figura 11 – Medidor eletromagnético de vazão (LUNUS, 2006)

Segundo Delmée (1989), os medidores magnéticos foram desenvolvidos como uma aplicação particular da lei de Faraday referente à tensão provocada por um condutor em movimento num campo magnético.

O princípio básico dos medidores magnéticos é semelhante ao de um gerador elétrico, os elementos são arranjados de forma que a direção do fluxo seja normal ao campo magnético.

De acordo com a lei de Faraday, o movimento do fluido atravessando o campo magnético induz uma força eletromagnética no fluido numa direção normal à do campo magnético e à direção média das partículas do fluido, conforme figura 10.

Colocando, então, um par de eletrodos em contato com o fluido no plano diametralmente normal ao do campo magnético e conectando-os a um voltímetro especial, o valor da fem poderá ser medido.

Os imãs podem ser do tipo permanente ou eletromagnético, de forma que existem dois tipos de medidores magnéticos: de corrente contínua e de corrente alternada. Do ponto de vista conceitual de instrumentação, e procurando diferenciar neste medidor os elementos primários dos elementos secundários, o gerador de campo magnético, o tubo e os eletrodos estão em primeiro grupo, ficando no segundo, os meios de medição de fem, incluindo os cabos de ligação dos eletrodos do medidor de fem.

O tubo de medição é feito de material não-magnético, como matéria plástica, latão, bronze, alumínio e aço inoxidável. Com tubos metálicos, é necessário usar um revestimento interno, para se evitar colocar em curto-circuito os elementos sensores da fem. Este revestimento pode ser de vidro ou de material termoplástico.

A incerteza da medição depende da calibração do medidor e do tipo de elemento secundário a que é ligado. Ela pode alcançar 0,5% do valor instantâneo, mas tipicamente é da ordem de 1% dos fundos de escalas.

Uma condutividade elétrica (CE) de $10\mu\text{S/cm}$ pode ser considerada como limite de condutividade para a maioria dos medidores magnéticos. Com equipamentos especiais pode-se atingir limites 100 vezes menores.

Este limite de condutividade não representa problema para utilização dos medidores de vazão em redes de abastecimentos nas Companhias de Saneamento, tendo em vista que a condutividade elétrica da água distribuída está em torno de 120 a 200 $\mu\text{S/cm}$.

Sendo a condutividade elétrica diretamente proporcional à quantidade de sólidos (sais) presentes na água, a utilização do medidor de vazão em questão é desaconselhada para sistemas de águas destiladas. Característica que não representa problema para o medidor investigado neste trabalho.

Medidores de vazão eletromagnéticos externos são pesados e de difícil instalação (figura 11), principalmente no caso de grandes diâmetros, e seus componentes não podem ser reparados em campo. São também os mais caros, principalmente para grandes diâmetros.

b) medidores eletromagnéticos de inserção com um sensor.

O medidor eletromagnético de inserção foi desenvolvido para a medição de vazão de líquidos em condutos fechados, este medidor não possui qualquer parte móvel e utiliza montagem por inserção, facilitando sua instalação em campo. As figuras 12 e 13 apresentam exemplos deste tipo de medidor.



Pilot magnético

Figura 12 – Medidor eletromagnético de inserção (DELMÉE, 1989)



Figura 13– Medidor eletromagnético de inserção (LUNUS, 2006)

Segundo Delmée (1989), este medidor, também denominado de Pitot magnético, consiste basicamente num medidor magnético de 10" de diâmetro cujas bobinas magnéticas estão completamente encapsuladas no material do revestimento. Mais recentemente os sensores foram embutidos em hastes bem menores, conforme se observa na figura 13.

Desta forma, o elemento primário pode ser completamente imerso em uma tubulação de grande diâmetro, suspenso por meio de uma haste que contém os condutores de alimentação das bobinas e os do sinal.

A instalação por inserção pode ser efetuada diretamente na tubulação através de uma luva ou por meio de acessórios como abraçadeiras ou tês, dependendo da versão.

A medição de vazão dentro do medidor representa, em princípio, a velocidade local. A vazão Q é deduzida da velocidade local V_1 através da relação

$$Q = K.A.V_1$$

Onde:

A é a área de escoamento

K é um fator que relaciona a velocidade local com a velocidade média.

Segundo Delmée (1983), a velocidade do fluido pode ser medida entre 0,1 e 4,8m/s, com incertezas variando de 0,5 a 2% de fundos de escalas.

c) medidores eletromagnéticos de inserção com múltiplos sensores.

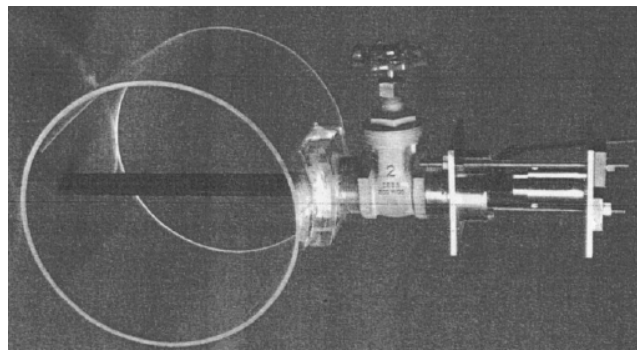


Figura 14 – Medidor eletromagnético de inserção de múltiplos sensores (AWWA, 1990)

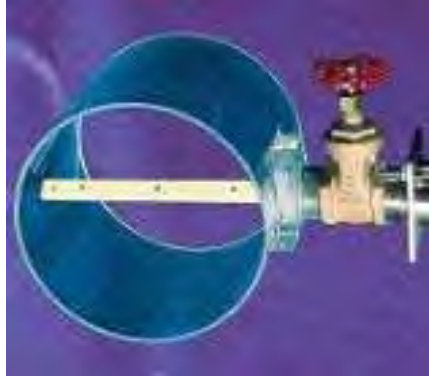


Figura 15 – Medidor eletromagnético de inserção de múltiplos sensores – Multi-Mag (MARSH-MCBIRNEY, 2007)

Segundo a American Water Works Association – AWWA (1990), os medidores eletromagnéticos de múltiplos sensores medem a vazão com base nas velocidades do fluido medidas em vários pontos de uma seção transversal do tubo.

Segundo a AWWA (1990) um medidor de inserção de múltiplos elementos instalado na seção transversal de um tubo pode apresentar uma medida ligeiramente melhor do escoamento que um tubo de Pitot de várias tomadas de pressão. Sensores com múltiplos elementos estão disponíveis para até 60 polegadas (1,5m), conforme figura 14. A sonda é suportada somente pelo ponto de inserção, de forma que a velocidade não pode exceder 3m/s. Para manter baixos os erros de medição são necessários de 10 a 15 diâmetros de comprimento à montante e 5 diâmetros de comprimento à jusante em sua instalação.

Este medidor apresentado pela AWWA, tem interesse especial para este trabalho, pois os medidores eletromagnéticos de múltiplas tomadas medem a vazão baseado na velocidade do fluido através de uma seção transversal

conhecida do tubo, exatamente como o medidor investigado em nossa pesquisa; porém a velocidade é determinada através do diferencial de pressão.

Com relação à afirmação pela AWWA, de que o medidor de inserção magnético de múltiplos elementos instalado na seção transversal de um tubo pode determinar a velocidade média do escoamento ligeiramente melhor do que um tubo de Pitot de várias tomadas de pressão, não podemos contextualizar estas informações por desconhecermos a real performance do primeiro.

Quanto à limitação da velocidade máxima citada pela AWWA, observa-se que para o medidor investigado no presente trabalho pode-se lançar mão de outro ponto de fixação da haste na geratriz inferior da tubulação, com a instalação de outro *TAP*, no caso de instalações de grandes diâmetros e altas velocidades, Um instrumento disponível atualmente no mercado nacional e internacional é o Multi-Mag fabricado e comercializado pela empresa Marsh-McBirney, conforme figura 15

.

4.2.5 Medidores ultrassônicos

Segundo Upp (1993), a categoria de medidores ultrassônicos contém diferentes projetos para medição de uma velocidade média em um sistema de escoamento. Todos eles são baseados na interação de um sinal ultrassônico com o meio em movimento. Para isso utilizam transmissores e receptores de sinal baseados em cristais piezoelétricos.

Existem medidores ultrassônicos nos quais os transdutores são presos à superfície externa da tubulação, e outros com os transdutores em contato direto com o fluido. Os medidores que têm maior aplicação industrial são os que podem ser aplicados externamente à tubulação, devido à facilidade de instalação.

A bibliografia de instrumentação - Delmée (1989), Doebelin (1990), Morris (1993), Bolton (1996) divide os medidores de vazão que usam a velocidade do som como meio auxiliar de medição em dois tipos principais: medidores de efeito Doppler e medidores de tempo de trânsito.

Embora os dois princípios possam ser usados em medidores internos, a maioria desses instrumentos utiliza o efeito Doppler, o que permite construir sondas de inserção com os transmissores e detectores montados em uma haste.

a) medidores de tempo de trânsito

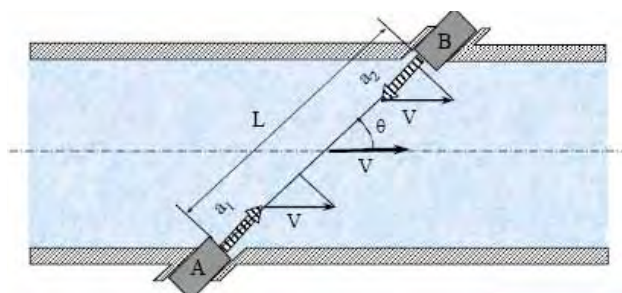


Figura 16 – Medidor ultrassônico de tempo de trânsito (TAIRA, 2003)

Este instrumento é composto por um par de transmissor-receptores ultrassônicos, colocados um em cada lado do tubo, no qual o fluido escoar. A velocidade de uma onda ultrassônica em uma direção é $(c + v \cdot \cos \theta)$ e em outra direção $(c - v \cdot \cos \theta)$, onde c é a velocidade do som no fluido.

Os transdutores transmitem e recebem alternadamente um trem de ondas ultrassônicas de pequena duração. O tempo de trânsito (t_1) é levemente inferior quando o sinal é orientado para jusante, e levemente superior (t_2) para montante. O medidor mede a diferença entre os tempos de trânsito e utiliza o processamento do sinal digital para calcular a vazão (figura 16). Existem 3 formas de executar esta medição, segundo Morris (1993): medição direta, conversão em diferença de fase e conversão em diferença de frequência. Morris considera a terceira opção mais atraente porque é a única que não depende da velocidade do som no fluido.

As condições de instalação afetam a acurácia e os resultados obtidos. A performance de um medidor ultrassônico depende de sua capacidade de encontrar a velocidade média, e não alterar esta capacidade com a variação da vazão. Não há partes móveis que requerem lubrificação, e a manutenção é basicamente no sistema de leitura do medidor.

Taira (2003) afirma que este medidor pode ser utilizado para tubos de 75mm de diâmetro até 1500mm, com velocidades do fluido entre 0,2m/s a 12m/s com uma incerteza de $\pm 1\%$ ou melhor. Estes também podem ser utilizados para medir escoamento em canais abertos ou rios.

Morris (1993) aponta que medidores de tempo de trânsito são mais utilizados que os de efeito Doppler, notadamente em tubulações de grande diâmetro, onde os tempos de trânsito podem ser medidos com maior acurácia. Morris considera que é possível reduzir os erros de medição a $\pm 0,5\%$ nesses casos favoráveis. Entretanto, o medidor é mais caro que os de efeito Doppler devido à complexidade da eletrônica necessária.

As vantagens do medidor ultrassônico são: nenhuma perda de carga, desde que o medidor obedeça as distâncias de instalação, taxas de pulsos de alta frequência minimizam erros oriundos dos efeitos da pulsação e flutuação do escoamento, as instalações podem ser simples e baratas, possui alta rangeabilidade, não existem partes móveis em contato com o fluido escoado.

As desvantagens deste medidor são: requer energia elétrica para sua operação, o perfil de velocidade deve ser muito bem desenvolvido para se obter uma boa média de velocidade, possui alto custo inicial. Para que a medição seja possível, os medidores de tempo de transito devem medir vazão de fluidos relativamente limpos

b) medidores de efeito Doppler

O princípio de operação do medidor de efeito Doppler é mostrado nas figuras 17 e 18. Os transdutores-emissores emitem trens de pulsos com frequência conhecida f_t . O sinal é refletido por partículas veiculadas pelo fluido e tem sua frequência alterada proporcionalmente ao componente da velocidade das partículas na direção do feixe, sendo captado pelo receptor com frequência f_r . A diferença de frequências, bem como a velocidade do som no meio, c , e o ângulo de reflexão θ determinam a velocidade do fluido v :

$$v = \frac{c(f_t - f_r)}{2f_t \cos(\theta)}$$

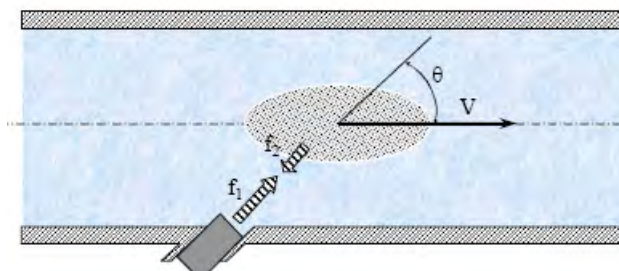


Figura 17 – Medidores ultrassônicos de efeito Doppler, (TAIRA, 2003)

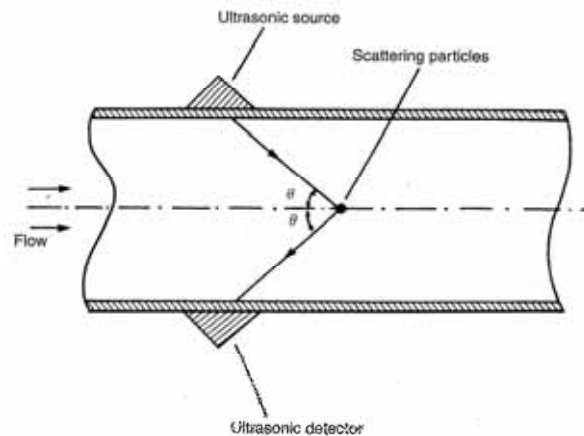


Figura 18 – Medidores ultrassônicos de efeito Doppler, (MORRIS, 1993)

Estes instrumentos são adequados para medir vazão de fluidos que contêm partículas capazes de refletir ondas acústicas, ao contrário do que ocorre com os medidores de tempo de trânsito, que não são adequados para medir vazão de fluidos que contenham partículas.

Embora utilizem eletrônica mais simples e de menor custo que os medidores de tempo de trânsito, segundo Morris (1993), os medidores ultrassônicos de efeito Doppler sofrem efeito de vários fatores locais que podem diminuir sua acurácia, como por exemplo a forma do perfil, a velocidade do som, número, forma e distribuição espacial das partículas refletoras presentes no escoamento e a espessura da parede do tubo. Conseqüentemente, a diminuição do erro depende de calibragem cuidadosa do instrumento nas condições locais da utilização. Sem esses cuidados, Morris aponta erros de até $\pm 10\%$ da leitura.

4.3. Perfis de velocidade e técnicas de pitometria

Nos trabalhos de medição e no equacionamento da medição com tubo de Pitot são adotadas algumas hipóteses simplificadoras:

- O escoamento é considerado permanente;
- O escoamento é considerado incompressível;
- O escoamento é tomado ao longo de uma linha de corrente;
- O atrito do líquido escoado é desprezado.

Em todas as instalações são levantados e analisados os perfis de velocidade no plano bidimensional, embora se saiba que o escoamento no interior de uma tubulação ocorre no espaço tridimensional e de maneira muitas vezes mais complexa que possa transparecer, como o exemplo da figura 19.

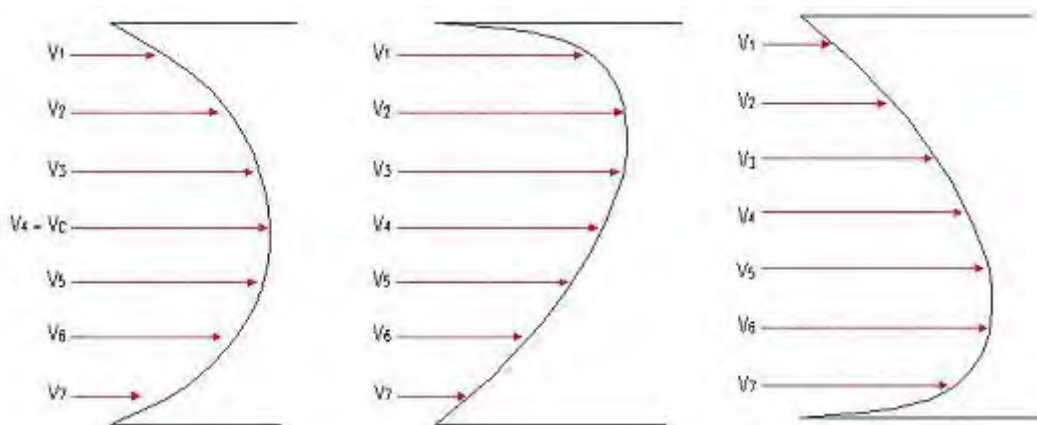


Figura 19 - Perfil de Velocidades

Os critérios de posicionamento das tomadas de medição em pitometria destinam-se a garantir que os perfis de velocidade amostrados sejam axialmente simétricos. Para isso, qualquer singularidade deverá estar a uma distância de 10 a 20 diâmetros à montante do medidor e 5 a 10 diâmetros à jusante.

A figura 20 representa o mapeamento do perfil de velocidade do escoamento em conduto forçado proposto por Cole, de onde foi extraída a equação 1.

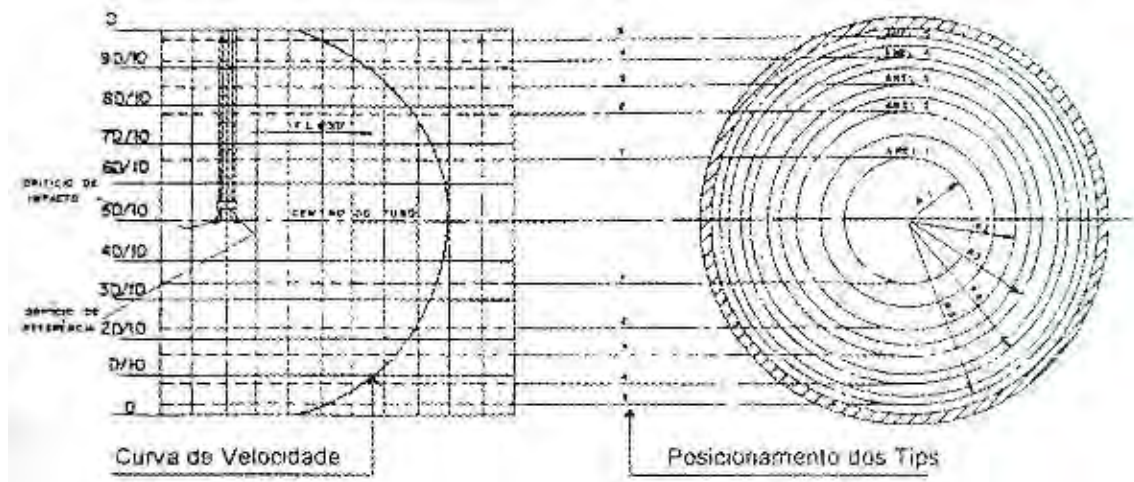


Figura 20 – Mapeamento do perfil de velocidade (SABESP, 2003)

$$R_n = R \left(\frac{2n - 1}{2N} \right)^{1/2} \quad \text{Equação 1}$$

R = Raio da seção do tubo

n = Número de ordem dos anéis a partir do centro

N = Número total de anéis (cinco)

R_n = Raio médio dos anéis de igual área

A figura 21 mostra os perfis de velocidades produzidos por Cole em uma tubulação de 12 polegadas para traverses vertical e horizontal.

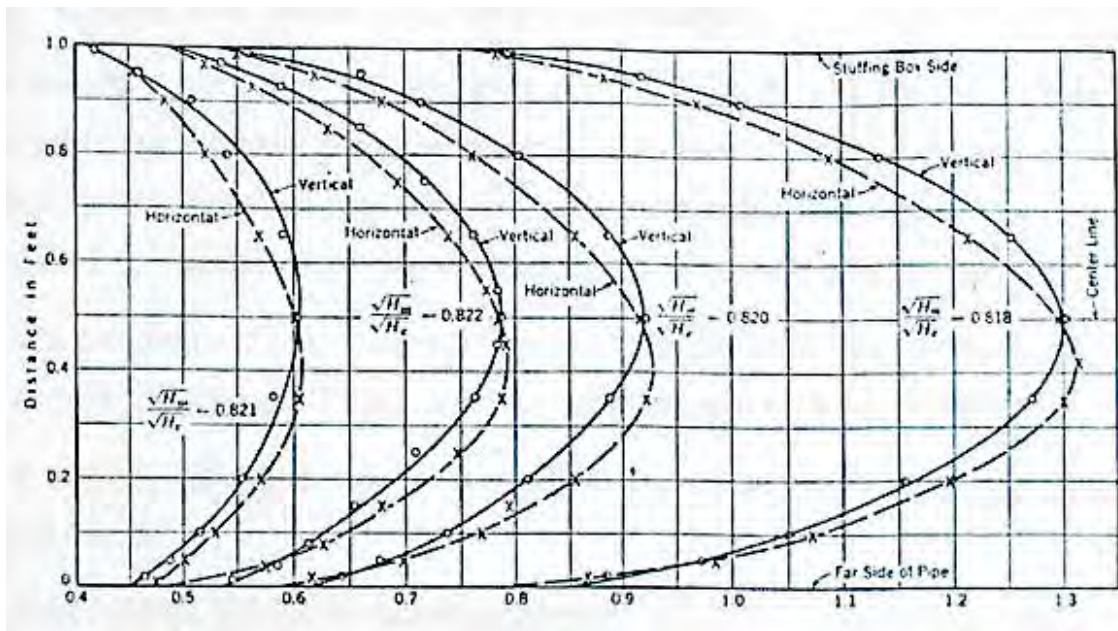


Figura 21 – Perfis de velocidades em tubulação de 12 polegadas (TAIRA, 2003)

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Sonda Multifuros e método de instalação

As sondas foram constituídas de dois tubos de aço inoxidável com comprimento variável ajustando-se a cada tubulação, \varnothing 6mm externo e \varnothing 4mm interno, com orifícios de \varnothing 4mm, atendendo à pressão máxima de trabalho de 2,0MPa.

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.

Detalhes construtivos da sonda objeto deste trabalho são apresentados no anexo 9.

As figuras 22 e 23 apresentam alguns aspectos da sonda construída.



Figura 22 – Foto da sonda construída



Figura 23 – Visão explodida da sonda construída

Onde na figura 23:

- 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 de borracha Buna N para vedação na parte superior do prato intermediário;
- 6 - Porca vazada recartilhada em Bronze SAE 40;

- 7 - Anel O'ring de borracha 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.

Para determinação dos posicionamentos dos orifícios na sonda foi seguido o critério do modelo matemático de coroas circulares de áreas iguais, ou seja, os furos foram posicionados no centro de cada um dos quatro anéis imaginários de mesma área em que se divide a tubulação, conforme figura 24.

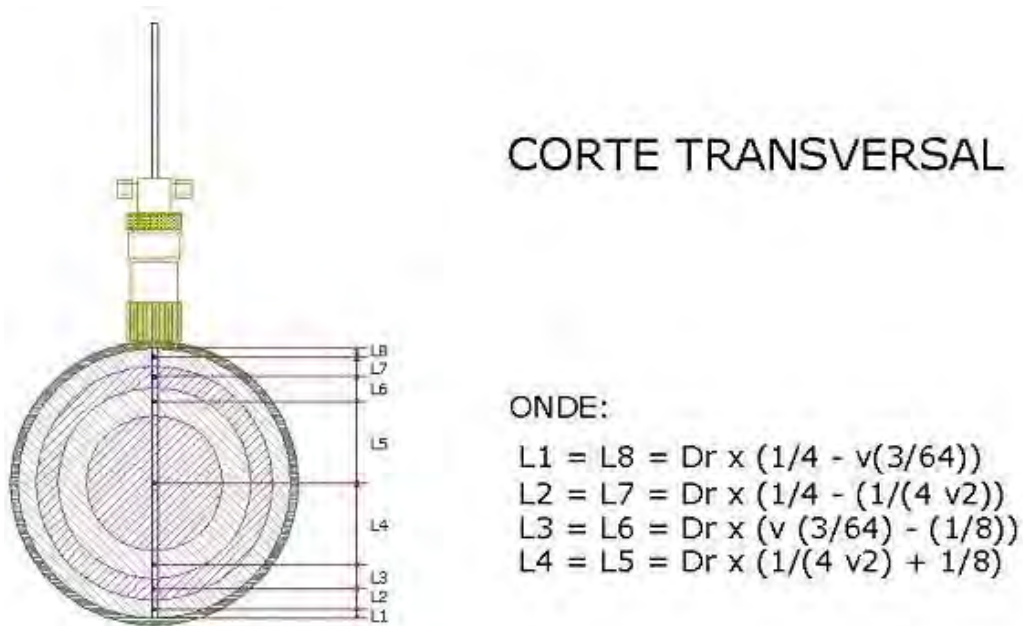


Figura 24 – Coroas circulares de áreas iguais

A pressão em cada um dos tubos é transmitida a um sensor eletrônico de pressão diferencial, situado na mesma cota destes, por meio de mangueiras de pressão $\varnothing 3/8''$, como as utilizadas por equipes de Pitometria.

Essas pressões coletadas nos tubos e enviadas através das mangueiras possuem valores distintos e diferenciados, principalmente pelo termo cinético das expressões da conservação de energia, conforme figura 25.

CORTE LONGITUDINAL

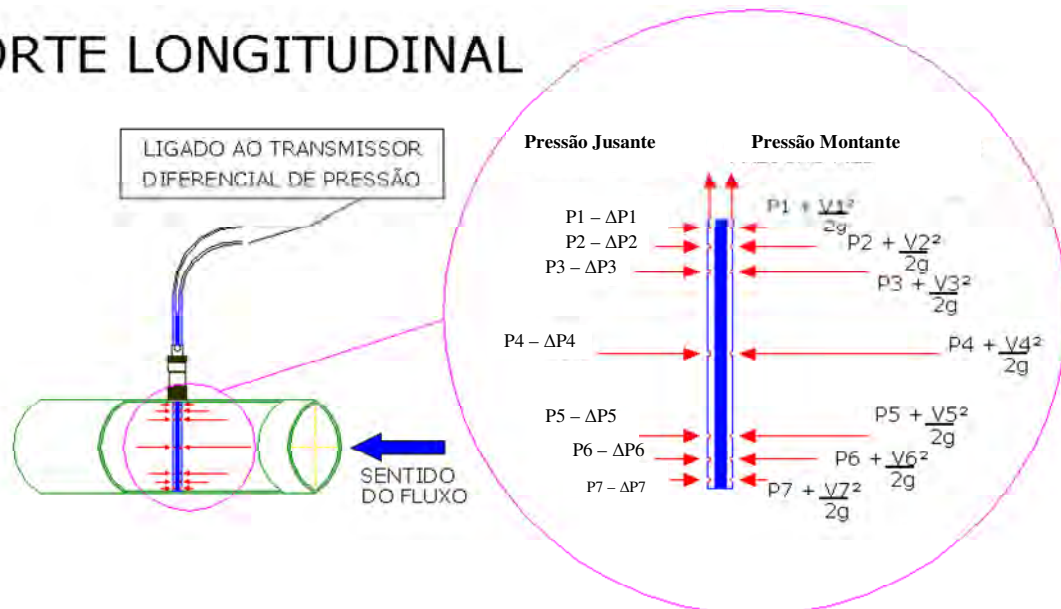


Figura 25 – Pressões coletadas nas hastes da sonda

As pressões transmitidas através das mangueiras, são indicadas por um transdutor de pressão diferencial modelo LD301, cuja concepção é de célula capacitiva, fabricado pela empresa Smar – Equipamentos Industriais (<http://www.smar.com/brasil/>), com sede em Sertãozinho – SP, conforme Figura 26.



Figura 26 – Transdutor de pressão diferencial LD301

O transdutor de pressão diferencial possui uma CPU – Unidade Central de Processamento incorporada, além de um sistema de compensação de temperatura e emite sinais analógicos que variam de 4 a 20mA, quando alimentados por uma tensão estabilizada de 24 VDC.

Para investigar a efetividade da solução de múltiplos furos em compensar a assimetria dos perfis de velocidade, os resultados da sonda de 7 furos foram comparados com uma sonda de apenas um furo, nas situações de perfil simétrico e assimétrico.

A construção da sonda de um furo utilizou a mesma técnica construtiva, mesmos materiais e dimensões, inclusive do diâmetro dos furos. A única exceção foi quanto ao posicionamento central do único furo, conforme ilustrado na figura 27



Figura 27 – As duas hastes de aço inoxidável com 1 furo e 7 furos

Foram utilizados em cada uma das instalações:

- Dois *TAP*'s para instalação na tubulação;
- Dois colares de tomada para fixação dos *TAP*'s (para rede fibrocimento);
- Um Tubo Pitot calibrado;
- Um Calibre para determinação do diâmetro real interno da tubulação ;
- Dois pares de mangueiras de diâmetro 3/8 polegada para transmissão de pressões diferenciais;
- Dois tubos em U acoplados ao Pitot para medições das deflexões (alguns casos);
- Transmissor de pressão diferencial acoplado ao tubo Pitot para determinação das deflexões (na maioria dos testes);
- Um transmissor de pressão diferencial com sinal de 4 a 20mA e PID – Proporcional, Integral e Derivativo, incorporado, sensor do tipo capacitivo, acoplado ao medidor a ser testado;
- Um *notebook* com planilha em Excel para determinação das vazões e constante do medidor.

5.2. Locais de instalação dos medidores

Esse trabalho foi desenvolvido em sua totalidade nas dependências da Sabesp, nos municípios de Presidente Prudente-SP e Presidente Epitácio-SP; porém daremos maior ênfase e estaremos realizando inúmeras simulações apenas nas instalações da saída para abastecimento da zona Alto ETA no município de Presidente Prudente-SP.

Os *TAP*,s implantados neste laboratório prático denominado Alto ETA foram em número de 3 (três), conforme figura 28 e desenho em AutoCAD, inserido no anexo 10, sendo:

- **TAP₁** com perfil de velocidade axialmente assimétrico, situado a 0,22m a jusante da curva inferior;
- **TAP₂** destinado a ensaiar o medidor em seção com perfil de velocidade axialmente simétrico e
- **TAP₃**, destinado a fazer todos os monitoramentos de vazão através do Tubo Pitot Cole utilizado como padrão de referência.

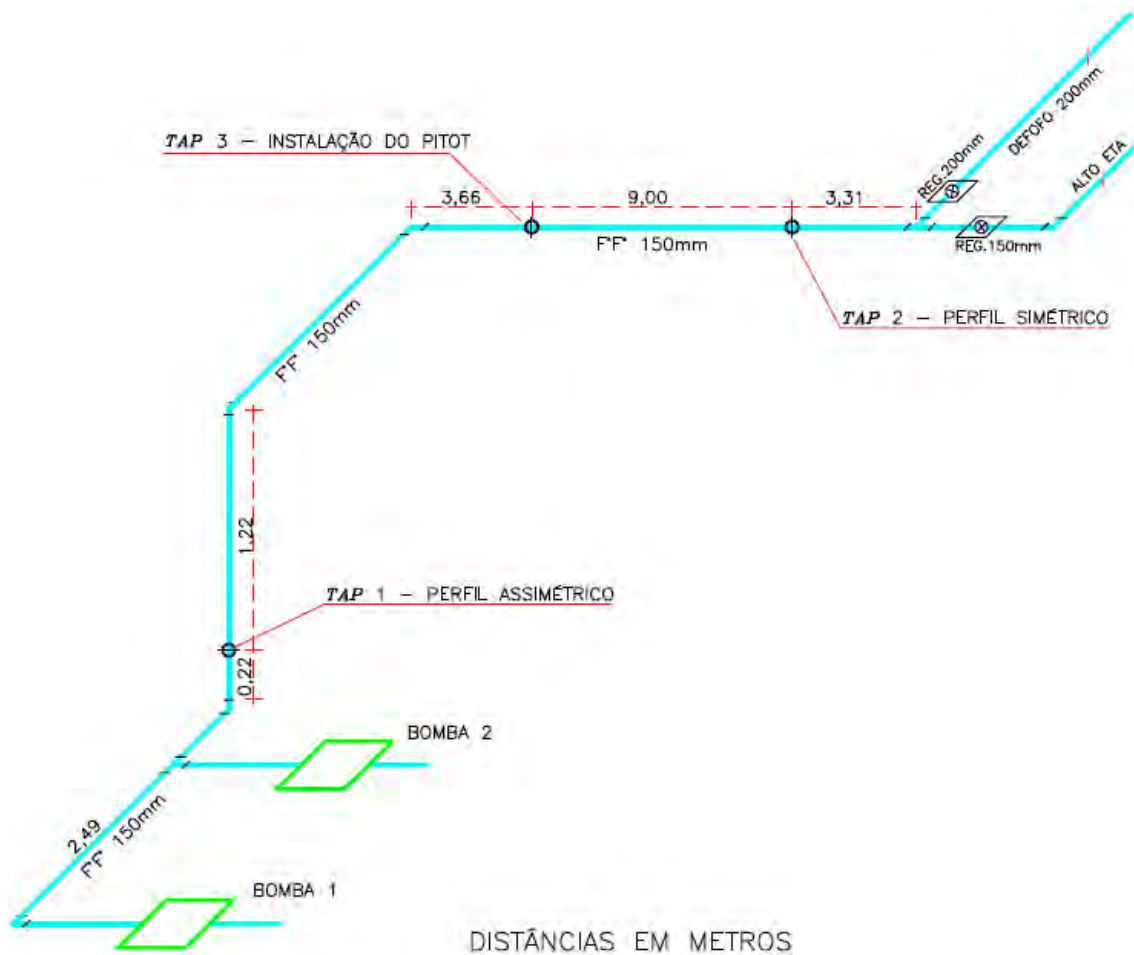


Figura 28 – Esquema isométrico da instalação dos TAPs no sistema Alto ETA



Figura 29 – TAP_1 instalado em local de assimetria axial do perfil de velocidade

Para análises laboratoriais da influência dos furos da sonda e testes de simulação de assimetria axial do perfil de velocidade foi utilizado o TAP_1 , conforme figura 29.

Os pontos de instalação dos TAP ,s para os mapeamentos de perfil de velocidade axialmente simétrico, foram escolhidos obedecendo aos critérios de pitometria, ou seja, qualquer singularidade deverá estar a uma distância de 10 a 20 diâmetros à montante do medidor e 5 a 10 diâmetros à jusante.

Em todas as instalações das sondas neste trabalho, foram utilizados dois TAP 's de bronze de uma polegada dispostos em série nas tubulações de ferro fundido. Nos casos de tubulações de fibrocimento, foram utilizados dois colares de tomada de ferro fundido onde os TAP ,s foram rosqueados.

Na instalação da Vila Formosa são transferidos os valores das vazões instantâneas, através de sinal de 4 a 20mA para um CLP – Controlador Lógico

Programável, existente no painel de controle das bombas, as quais são acionadas por conversores de frequência e que através de um rádio modem envia os sinais para a ETA de Presidente Prudente-SP distante 5Km, que passa por sua vez a exibir os valores na tela do supervisor que lá existe.

Um manômetro de Bourdon e um amperímetro também foram utilizados, obtendo, pressão de trabalho e corrente elétrica.

Todos os medidores de vazão tiveram o mesmo desenvolvimento, porém o medidor de vazão instalado na ETA de Presidente Epitácio teve o número de orifícios da sonda alterado. Esta sonda foi construída com dois furos posicionados em cada um dos quatro anéis imaginários de mesma área em que foi dividida a tubulação, totalizando quatorze furos. Não houve alteração significativa das medições em relação à sonda de sete furos.

5.3. Metodologia de calibração das sondas na instalação do Alto ETA

As sondas foram calibradas com a utilização de um tubo de Pitot do tipo Cole como padrão de referência, instalado no TAP_3 , onde foi determinado com antecedência um perfil de velocidades para uma determinada vazão.

A partir da integração desse perfil foi calculado o coeficiente de velocidade do tubo de Pitot para aquela seção. A partir daí, para cada vazão ensaiada, efetuou-se a leitura com o padrão de referência na linha central do tubo, calculando-se a vazão real com a utilização deste coeficiente.

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. Para o caso de medição de vazões de água o método volumétrico direto seria o método padrão mais adequado, devido a sua simplicidade. Entretanto, o tubo de Pitot Cole foi utilizado como padrão de trabalho devido à impossibilidade prática de adoção

do método volumétrico direto na instalação em escala real utilizada na presente pesquisa. Além de modificações nas tubulações seria necessário interromper o abastecimento para a realização das medições, o que inviabilizaria o trabalho.

Foram levantadas curvas de calibragem das sondas de 7 furos e de 1 furo nas seções de perfil simétrico (TAP_2) e assimétrico (TAP_1). Para a caracterização do perfil nas seções de calibragem foi utilizado o tubo de Pitot, com uma vazão determinada.

A figura 30 apresenta os perfis de velocidade obtidos com o tubo de Pitot nas duas seções de calibragem utilizadas, caracterizando uma situação recomendada de perfil simétrico e uma de perfil assimétrico.

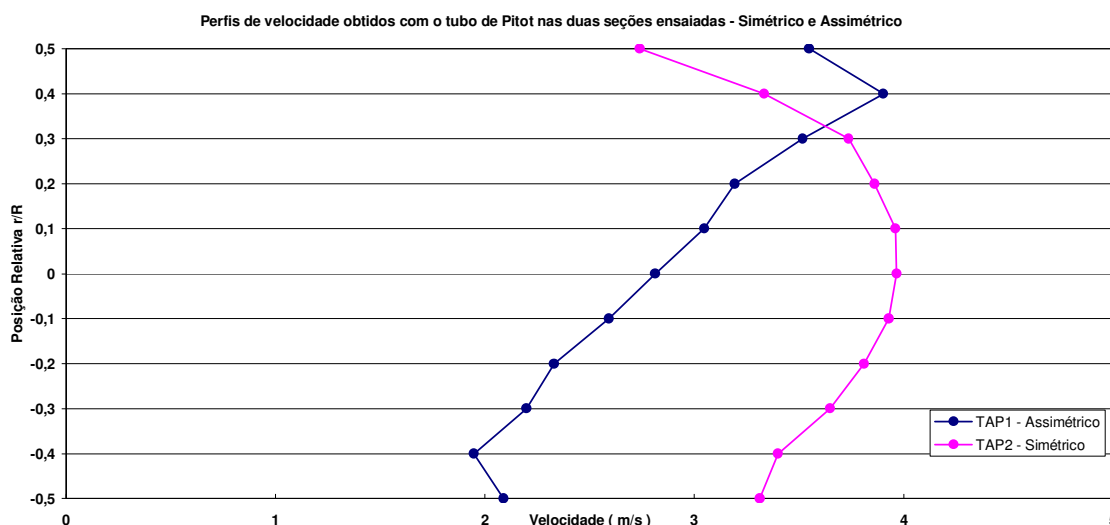


Figura 30 – Perfis de velocidade nas duas seções utilizadas

Para a calibragem foi ampliado o limite inferior de vazões, estendendo a faixa de medições de vazões do medidor até o correspondente a uma velocidade mínima de 0,3m/s que é também o limite prático de emprego do Tubo de Pitot, (TAIRA, 2003).

5.4. Metodologia de ajuste dos medidores instalados em campo

Todos os demais medidores instalados em campo, conforme descrito no item 5.2, foram ajustados seguindo uma metodologia simplificada de ajuste, que supõe uma curva linear de vazão em função da raiz quadrada da diferença de pressão medida pelo sensor capacitivo.

Este procedimento emprega apenas uma leitura do tubo de Pitot padrão de referência, instalado em outro *TAP* disposto em série na mesma tubulação. O valor da vazão é inserido em menu apropriado do sistema computadorizado de condicionamento do sinal que, a partir daí, passa a registrar diretamente o valor instantâneo da vazão em unidades de engenharia.

Nos testes de campo foram causadas propositadamente entradas de ar nas mangueiras para verificação de seu efeito nas medições; porém como os transmissores são instalados na cota da geratriz superior das tubulações, os valores reais não foram distorcidos.

Para efeito de verificação de comportamento, em alguns testes utilizou-se o tubo Pitot Cole associado a manômetros em U com líquidos manométricos.

Porém como estes líquidos estão proibidos de serem utilizados em água de abastecimento público, a maioria dos testes serão realizados com o novo sistema desenvolvido pelo IPT em 2003 para determinação de vazão em estações pitométricas com tecnologia puramente digital de aquisição de dados, em substituição ao sistema analógico com manômetros em U.

5.5. Análise dos dados de calibração

Os testes contaram com a realização de 66 medições de deflexões nos três *TAP*s instalados com a utilização do Tubo Pitot Padrão, sendo 11 leituras com medidas descendentes e onze ascendentes para cada *TAP*, com a finalidade

de mapear os perfis de velocidade no interior da tubulação escolhida para realização da investigação do instrumento.

Outros 20 testes foram realizados simulando variações de vazão, sendo 10 testes com velocidades que variaram de 0,33m/s a 3,14m/s, gerando 50 eventos entre vazão do equipamento padrão, vazão e deflexão da haste de 1 furo no TAP_2 - simétrico, vazão e deflexão da haste de sete furos no TAP_1 - assimétrico e 10 testes com velocidades que variaram de 0,35m/s a 2,98m/s, gerando outros 50 eventos.

Nos testes de campo foi levantado um valor verdadeiro de vazão através do Tubo Pitot tomado como padrão de calibragem gerando leituras que denominamos de leitura X_i e um valor de vazão medido pelo dispositivo investigado ou variável dependente que denominamos de leitura Y_i , cada uma em sua faixa de interesse.

Neste estudo foram elaboradas para calibragem do medidor investigado, equações que descrevem os lugares geométricos de retas do tipo $Y_i = m.X_i + b$, ajustadas pelo método dos mínimos quadrados e como limites de erro nas dispersões das várias leituras, o desvio padrão da variável dependente S_y que é um reflexo das variações de m e b medidas pelos seus respectivos desvios padrão S_m e S_b .

Como equação de utilização do medidor, foram utilizadas expressões derivadas das anteriores, do tipo $X_i = \frac{Y_i - b}{m}$, onde seus limites de erro são dados pela variância da variável independente S_x^2 .

O cálculo da incerteza de medição pode ser considerado como uma tentativa de definir, em concordância com regras padrões, os limites razoáveis do resultado obtido (DOIRON & STOUPE, 1997).

Para se realizar a comparação entre qual medidor, haste com 1 furo ou haste com 7 furos, terá melhor eficiência se calibrado em um ponto com condições hidráulicas favoráveis e utilizados em outro, será utilizado um critério de comparação balizado nas equações de utilização do medidor investigado com os seus diferentes parâmetros dimensionais, bem como os coeficientes de correlação linear de Pearson (R^2), os resíduos médios quadráticos (S_x) e dos limites de erro.

Com relação ao coeficiente de correlação linear de Pearson, este será utilizado para medir a relação linear entre as duas variáveis e estará sempre situado entre -1 e 1, podendo ser avaliado segundo a interpretação abaixo:

-1,0 = correlação forte e inversa, muito boa

-0,5 = correlação moderada e inversa, ruim

0,0 = não há correlação alguma

0,5 = correlação moderada e direta, ruim

1,0 = correlação forte e direta, muito boa

Com relação aos limites de erro de medição é muito importante porque as medidas são apenas estimativas de resultados e há necessidade de saber o quanto este resultado aproxima-se do valor correto.

Serão calculados neste trabalho limites estatísticos para a faixa de variação dos valores, baseado em intervalos de confiança de 99% (3 desvios padrão) e valor médio da variação (0,67 desvios padrão).

O quadro 1 apresenta a nomenclatura utilizada na análise das equações e cálculo estatístico dos erros.

Quadro 1 - Nomenclatura utilizada no desenvolvimento das equações de cálculo de erros.

S_y	=	Desvio padrão da variável dependente (leituras do medidor)
S_x	=	Desvio padrão da variável independente (valores verdadeiros)
S_x^2	=	Variância da variável independente
S_m	=	Desvio padrão da inclinação da reta (coeficiente angular)
S_m^2	=	Variância da inclinação da reta (coeficiente angular)
S_b	=	Desvio padrão da intersecção com o eixo vertical (coeficiente linear)
S_b^2	=	Variância da intersecção com o eixo vertical (coeficiente linear)
$3S$	=	± 3 desvios padrão da média $\approx 99,7\%$ na distribuição Gaussiana
$0,674S$	=	$\pm 0,674$ desvios padrão da média $\approx 50\%$ na distribuição Gaussiana
Y_i	=	Quantidade medida com o equipamento (variável dependente)
X_i	=	Quantidade medida com o padrão (variável independente)
m	=	Inclinação da reta (coeficiente angular)
b	=	Intersecção com o eixo vertical (coeficiente linear)

6. RESULTADOS

6.1. AVALIAÇÃO DO EFEITO DE MÚLTIPLOS FUROS

Para que um medidor com essa concepção possa ser empregado com bom nível de segurança e confiabilidade metrológica em qualquer tipo de perfil é indispensável que existam modelos matemáticos que permitam prever a influência das deformações do perfil de velocidades sobre as leituras.

Neste capítulo procura-se avaliar, ainda que de forma preliminar, o efeito da existência de múltiplas tomadas de pressão sobre a leitura de pressão proporcionada pelo medidor.

Este esforço de equacionamento se deve às inúmeras alegações encontradas na literatura, sem demonstração, de que a existência de múltiplas tomadas de pressão provocaria um efeito de medianização da leitura de vazão. Apenas como exemplo, pode-se citar Doebelin (1990), pg 574, Bolton (1996), pg 215, AWWA (1990), pg. 601, Morris (1993), pg.327.

A primeira conseqüência que se pode prever da inserção de uma haste com vários orifícios no interior de um escoamento com perfil variável de velocidades será a ocorrência de uma recirculação interna de fluido pela haste, entre o furo exposto às regiões de maiores velocidades e o furo exposto às menores velocidades.

A partir do raciocínio do parágrafo anterior, e limitando inicialmente a análise a uma haste com apenas dois furos, por simplicidade, pode-se inferir que em nenhum dos dois orifícios existirá um ponto de estagnação. Em um deles a água penetrará a haste com uma velocidade não nula, gerando a vazão de circulação, que descarregará através do outro orifício como um jato afogado em contracorrente.

Com essas premissas a análise do jato que descarrega na zona de menor velocidade é apresentada a seguir, com apoio do esquema da figura 31.

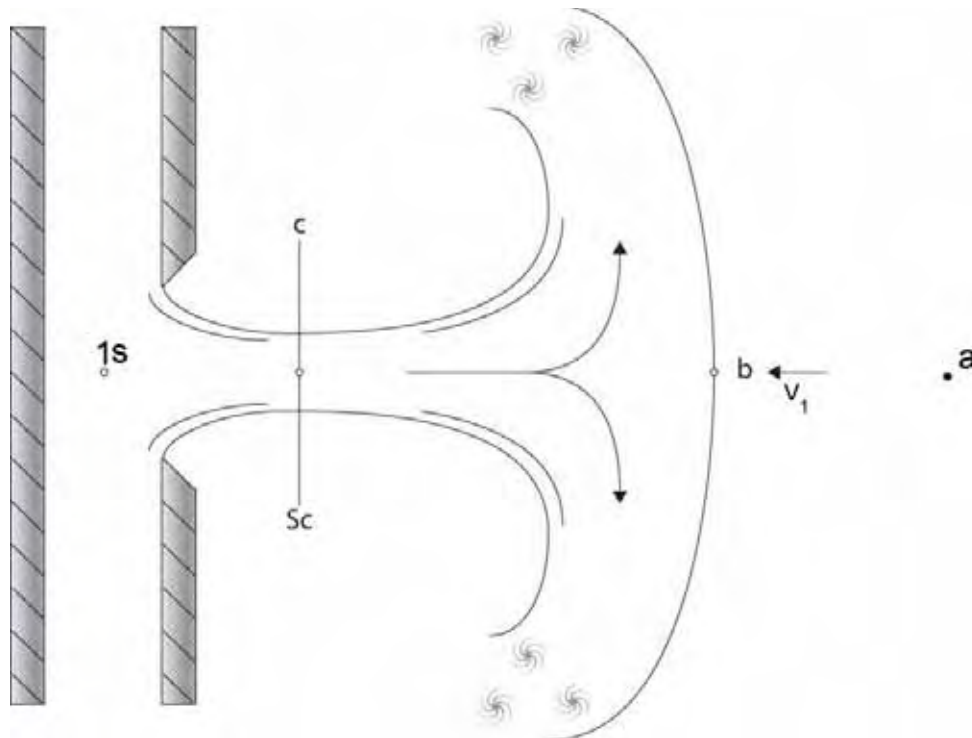


Figura 31 – Linhas de fluxo no furo de saída da haste, afogadas e com escoamento de contra corrente.

Entre o ponto “1s” e o ponto “c”, situado na seção contraída do jato da figura 31, o escoamento ocorre da mesma maneira que em um orifício afogado normal, descarregando em água parada. As linhas de fluxo possuem bastante curvatura, as velocidades aumentam e a pressão diminui. Neste trajeto ocorre a perda de carga na saída do orifício.

Por hipótese de jato afogado em fluido estagnado, poderíamos considerar a pressão em “c” igual à pressão estática do fluido na seção, mesmo com escoamento em contra corrente. O orifício descarrega com uma pressão estática na seção contraída superior à pressão estática do fluido.

No trecho entre “c” e “b” a velocidade diminui e tanto a pressão como a área do jato aumentam, pelo efeito da desaceleração provocada pela água em contra corrente.

Neste trajeto o comportamento do jato fica menos previsível e, possivelmente, dependerá das velocidades de saída e do fluxo em sentido contrário.

Pode-se supor que para velocidades de saída altas em relação à velocidade do fluxo contrário, o comportamento do jato será semelhante à descarga em fluido estagnado.

À medida que aumenta a velocidade do fluido em sentido contrário, deve diminuir a extensão em que o jato permanece com suas linhas de fluxo unidas, aumentando a incerteza sobre o seu comportamento.

Apesar dessa incerteza sobre o comportamento do jato a partir do ponto “c” será adotada a hipótese de desaceleração gradual entre os pontos “c” e “b”, considerado como ponto de estagnação.

Isso implica também em uma desaceleração gradual do fluido no tubo entre o ponto “a”, situado em uma região não perturbada pela presença da haste, e o ponto “b”. Portanto, $V_b = 0$.

Pode-se supor escoamento sem perdas entre “c” e “b” no jato, ou seja, escoamento desprezando a tensão de cisalhamento do fluido atuando na superfície de contato do jato, bem como as trocas de quantidade de movimento devido aos turbilhões.

Esta hipótese é relativamente frágil, pois equivale a considerar um escoamento potencial do jato no seio do fluido em movimento, mas compatível com a simplicidade que se deseja para viabilizar um equacionamento exploratório do problema, visando responder alguns questionamentos com relação à circulação interna na haste do medidor investigado.

Com todas as considerações citadas, as equações válidas para o escoamento no furo de saída da haste são as seguintes:

$$\frac{P_{1s}}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} = \frac{P_c}{\gamma} + \frac{V_c^2}{2g} + \Delta h_{\text{saída}} \quad \text{Equação 6.1}$$

$$\frac{P_c}{\gamma} + \frac{V_c^2}{2g} = \frac{P_b}{\gamma} \quad \text{Equação 6.2}$$

$$\frac{V_a^2}{2g} + \frac{P_a}{\gamma} = \frac{P_b}{\gamma} \quad \text{Equação 6.3}$$

Sendo $V_a = V_1$, a velocidade na cota Z_1 do tubo.

A análise do fenômeno na segunda abertura da sonda (haste), situada em ponto com maior velocidade, é baseada na figura 32.

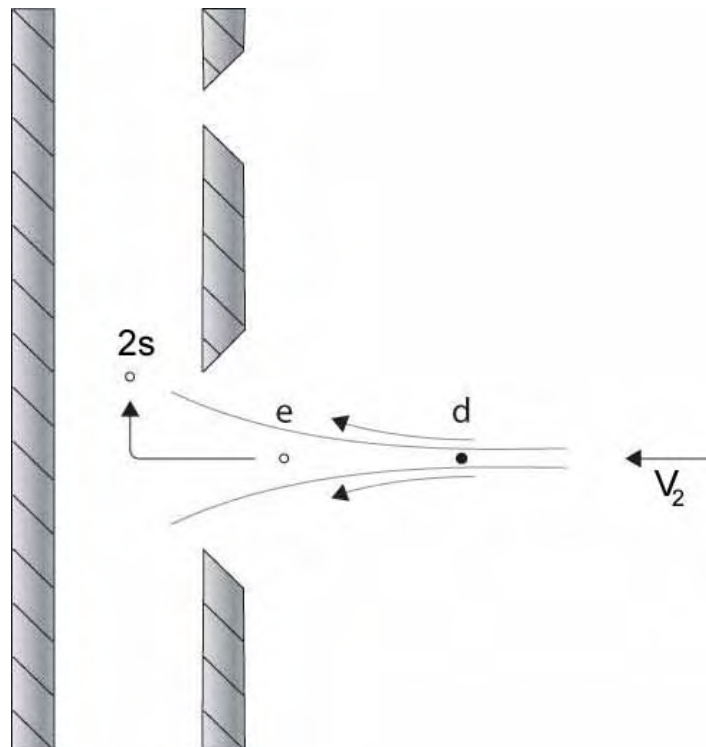


Figura 32 – Linhas de fluxo na entrada da sonda.

Entre os pontos “d” e “e” ocorre uma desaceleração do fluido, supostamente sem perdas. Esta é uma hipótese aceitável, normalmente empregada na análise de orifícios. O ponto “d” situa-se na região não perturbada pela presença da haste e, portanto, $V_b = V_2$, velocidade na cota Z_2 do perfil de velocidades do tubo.

Segue que $P_d = P_2$, pressão estática do tubo

Entre os pontos “e” e “2s” o escoamento sofre a perda de carga na entrada do orifício.

A equação da energia do fluido na região de entrada do orifício da sonda fica:

$$\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{P_e}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2g} = \frac{P_{2s}}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} + \Delta h_{\text{entrada}} \quad \text{Equação 6.4}$$

No interior da haste tem-se uma situação de escoamento em conduto forçado, entre os pontos “2s” e “1s”, situados nas cotas Z_2 e Z_1 respectivamente, conforme a figura 33.

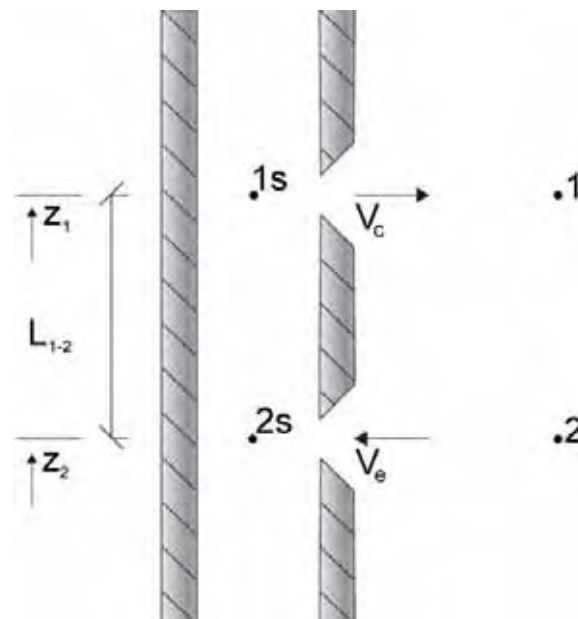


Figura 33 – Perda de carga ao longo da haste.

A equação da energia do fluido escoado no interior da sonda fica:

$$\frac{P_{2s}}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_{1s}}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_1 + \Delta h_{\text{tubo}} \quad \text{Equação 6.5}$$

Sendo $Z_1 - Z_2 = L_{1-2}$, o comprimento do tubo entre as duas aberturas (entrada e saída), a equação anterior fica:

$$\frac{P_{2s} - P_{1s}}{\gamma} = L_{1-2} + \Delta h_{\text{tubo}} \quad \text{Equação 6.6}$$

Utilizando a equação de Euler na direção perpendicular às linhas de corrente na seção não perturbada do escoamento, pode-se dizer:

$$P_d = P_a + \gamma (h_1 - h_2) = P_a + \gamma \cdot L_{1-2} \quad \text{Equação 6.7}$$

$$\frac{P_d - P_a}{\gamma} = L_{1-2} \quad \text{Equação 6.8}$$

Usando a equação da energia no fluido entre os pontos 2 e 1, com apoio das hipóteses explicitadas nas equações 6.1 a 6.6, tem-se:

$$\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + \Delta h_{\text{entrada}} + \Delta h_{\text{tubo}} + \Delta h_{\text{saída}} \quad \text{Equação 6.9}$$

$$\frac{P_2 - P_1}{\gamma} - \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = L_{1-2} + \Delta h_{\text{entrada}} + \Delta h_{\text{tubo}} + \Delta h_{\text{saída}} \quad \text{Equação 6.10}$$

Com a equação 6.8 em 6.10 vem:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = \Delta h_{\text{entrada}} + \Delta h_{\text{tubo}} + \Delta h_{\text{saída}} \quad \text{Equação 6.11}$$

A equação 6.11 mostra que a energia para o escoamento no interior da sonda é fornecida pela diferença de cargas cinéticas entre os dois pontos do perfil de velocidades.

Cálculo da influência do segundo furo.

Com as hipóteses adotadas para descrever o fenômeno, apresentadas nas equações 6.1 a 6.8, pode-se quantificar o efeito da presença de um segundo furo sobre a leitura da pressão efetuada pelo transdutor.

Inicialmente considera-se uma sonda tradicional, com haste de apenas 1 (um) furo, situado na altura do ponto 2, conforme a figura 34.

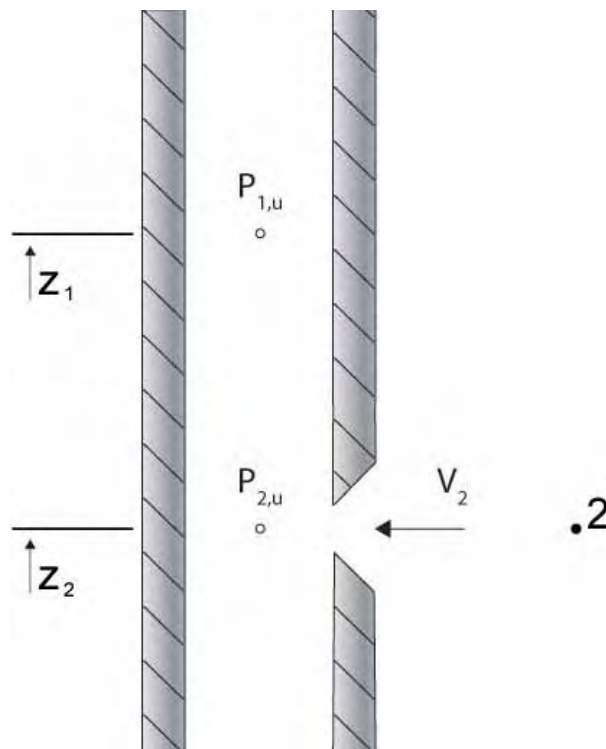


Figura 34 – Esquema de sonda de 1 (um) furo.

Esta é a situação tradicional, com $P_{2,u}$ igual à pressão total, e fluido estático no interior do tubo.

Tem-se:

$$\frac{P_{2,u}}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Equação 6.12}$$

$$\frac{P_{1,u}}{\gamma} = \frac{P_{2,u}}{\gamma} - L_{1-2} \quad \text{Equação 6.13}$$

As equações 6.12 e 6.13 mostram que a leitura no transdutor de pressão para 1 (um) furo é dada por:

$$\frac{P_{1,u}}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} - L_{1-2} \quad \text{Equação 6.14}$$

Quando se abre o segundo furo na altura do ponto 1 (um) do tubo, a situação passa a ser a mostrada pela figura 33. A leitura no transdutor será P_{1s} .

Tem-se da equação 6.6 que:

$$\frac{P_{1s}}{\gamma} = \frac{P_{2s}}{\gamma} - L_{1-2} \cdot \Delta h_{\text{tubo}} \quad \text{Equação 6.15}$$

O objetivo é determinar a variação da leitura, em termos de carga, no sensor de pressão.

Chamando este termo de Δl , vem das equações 6.14 e 6.15.

$$\Delta l = \frac{P_{1,u} - P_{1s}}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{P_{2s}}{\gamma} + \Delta h_{\text{tubo}} \quad \text{Equação 6.16}$$

Da equação 6.4 vem:

$$\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{P_{2s}}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h_{\text{entrada}} \quad \text{Equação 6.17}$$

Usando a equação 6.17 na 6.16 vem:

$$\Delta l = \frac{V_s^2}{2g} + \Delta h_{\text{entrada}} + \Delta h_{\text{tubo}} \quad \text{Equação 6.18}$$

Tem-se ainda que:

$$\Delta h_{\text{tubo}} = f \cdot \frac{L_{1-2}}{2} \cdot \frac{V_s^2}{2g} \quad \text{Equação 6.19}$$

Utilizando para o fator de atrito “ f ” a equação de Blasius (1913, apud Quintela, 1985), válida para condição de tubo liso e $Re > 3.000$, tem-se:

$$f = 0,3164 \cdot \left(\frac{V_s \cdot D}{\nu} \right)^{-0,25} \quad \text{Equação 6.20}$$

Adotando valores típicos para o problema, $\nu = 1.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e $D = 0,004 \text{ m}$, obtem-se:

$$f = 0,00398 \cdot V_s^{-0,25} \quad \text{Equação 6.21}$$

Adotando para as perdas concentradas uma analogia com conexão em “T” e com líquido em repouso em um dos ramos:

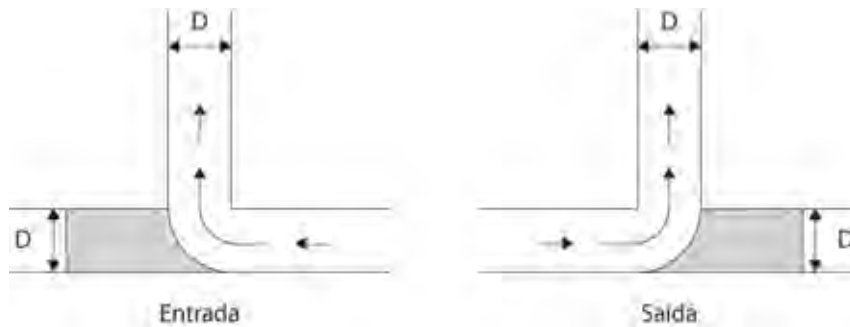


Figura 35 – Perdas de carga quando não há escoamento em um dos ramos

Segundo Quintela (1985), pág 187, as perdas para as condições ilustradas na figura 35 são dadas por:

$$\Delta h_{\text{saída}} = 1,03 \cdot \frac{V_s^2}{2g} \quad \text{Equação 6.22}$$

$$\Delta h_{\text{entrada}} = 1,01 \cdot \frac{V_s^2}{2g} \quad \text{Equação 6.23}$$

Usando as informações das equações 6.21 a 6.23 na equação 6.11, vem:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = (0,00398 \cdot V_s^{-0,25} \cdot \frac{L_{1-2}}{0,004} + 1,01 + 1,03) \cdot \frac{V_s^2}{2g} \quad \text{Equação 6.24}$$

Supondo conhecidas as velocidades V_1 e V_2 calcula-se V_s com a equação 6.24. Com V_s na equação 6.18 calcula-se a variação Δl .

$$\Delta l = (1 + f \cdot \frac{L_{1-2}}{D} + K_{\text{entrada}}) \cdot \frac{V_s^2}{2g} \quad \text{Equação 6.25}$$

Avaliação numérica para um caso típico

Adotando um caso típico com uma tubulação de 250mm de diâmetro e uma haste com 1 (hum) furo central e outro próximo à parede do tubo, encontra-se com $L_{1-2} \approx 0,10\text{m}$. Com esse valor na equação 6.24 obtém-se:

$$V_2^2 - V_1^2 = (0,0995 \cdot V_s^{-0,25} + 2,04) \cdot V_s^2 \quad \text{Equação 6.26}$$

A equação 6.26 mostra que as perdas concentradas são muito mais importantes que a perda distribuída ao longo da haste entre os dois furos.

Para exploração das equações adotou-se inicialmente 4 (quatro) valores de V_2 (2,0; 2,2; 2,6; 2,8m/s) com $(V_2 - V_1)$ variando entre 0,0 e 1,0m/s.

Os pares de $V_2^2 - V_1^2$ obtidos das combinações acima foram inseridos na equação 6.26, obtendo-se os valores correspondentes de V_s . Esses valores, colocados na equação 6.18, com auxílio das equações 6.21 e 6.22, permitiram calcular as variações de leitura Δl .

Os resultados dessa simulação numérica são apresentados na figura 36. Observa-se que quanto maior a velocidade central menor é a influência do segundo furo sobre a diminuição da leitura.

Com velocidade de 2,0m/s na região central, uma diferença de 0,2m/s entre as duas tomadas provoca uma variação superior a 0,20m, enquanto que com velocidade central de 2,8m/s o efeito diminui para menos de 0,05m.

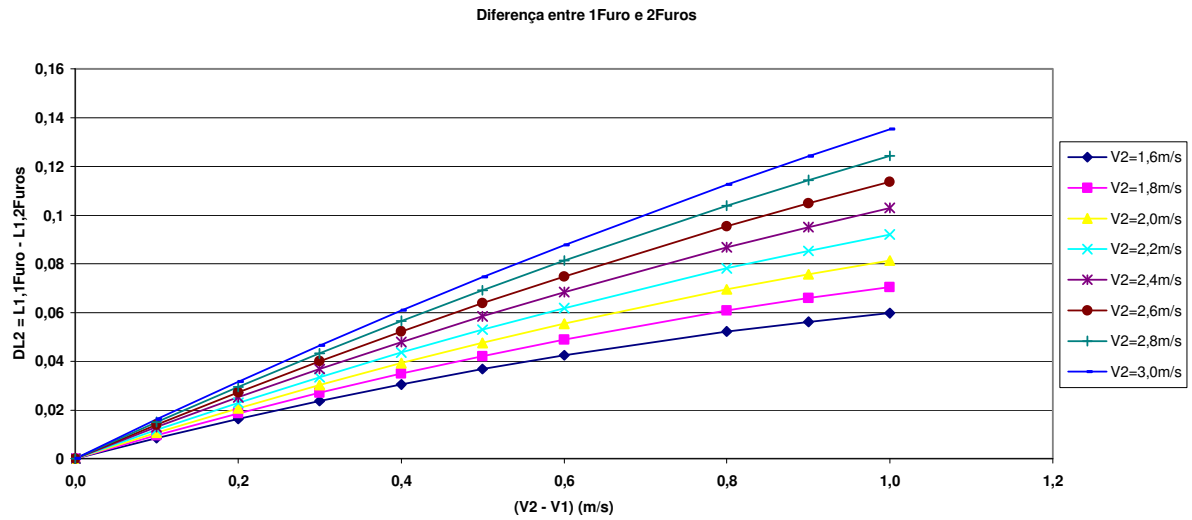


Figura 36 – Curvas da influência de mais de uma tomada de pressão na sonda em função da variação de $(V_2 - V_1)$ na equação 6.18.

Caso com 3 (três) furos em perfil simétrico

Este caso considera uma extensão simples do problema já analisado.

Supõe-se um medidor com 3 (três) furos instalado inicialmente em um perfil simétrico de velocidades, conforme esquema da figura 37.

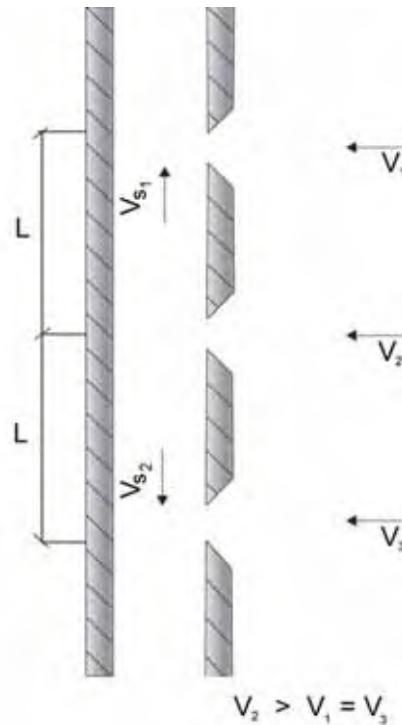


Figura 37 – Medidor de 3 (três) furos instalado em perfil simétrico.

Nesse caso, como os furos 1 e 3 situam-se simetricamente em relação ao furo central, tem-se que $V_1 = V_3$.

Para esta situação tem-se $V_{s1} = V_{s2}$.

As equações disponíveis são:

$$\text{Energia de 2-1} \quad \therefore \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = \Delta h_{\text{entrada}} + \Delta h_{\text{trecho 1}} + \Delta h_{\text{saída 1}} \quad \text{Equação 6.27}$$

$$\text{Energia de 2-3} \quad \therefore \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} = \Delta h_{\text{entrada}} + \Delta h_{\text{trecho 2}} + \Delta h_{\text{saída 2}} \quad \text{Equação 6.28}$$

$$\text{Continuidade} \quad \therefore V_e \cdot A_e = V_{s1} \cdot A_s + V_{s2} \cdot A_s \quad \text{Equação 6.29}$$

Como $V_1 = V_3$, segue das equações 6.26 e 6.28 que $V_{s1} = V_{s2}$.

Esse resultado na equação da continuidade 6.29 mostra que $V_e = 2V_s$

Adotando para as perdas as mesmas equações já utilizadas, vem:

$$\Delta h_{\text{entrada}} = 1,01 \cdot \frac{V_e^2}{2g} = 2,02 \cdot \frac{V_s^2}{2g} \quad \text{Equação 6.30}$$

As perdas distribuídas e de saída ficam iguais às do caso anterior, (equações 6.21 e 6.22); respectivamente.

Com as equações 6.30, 6.21 e 6.22 na equação 6.27 vem:

$$(V_2^2 - V_1^2) = (0,0995 \cdot V_s^{-0,25} + 3,03) V_s^2 \quad \text{Equação 6.31}$$

Admitindo-se os mesmos valores numéricos típicos do caso anterior, ou seja $L_{1-2} = L_{1-3} = 10\text{mm}$; $D = 4\text{mm}$; $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Dados os valores numéricos de V_2 e V_1 , pode-se calcular V_s com a equação 6.31 e, usando a equação da energia, o valor da leitura da carga no ponto 1.

Denominando a pressão no ponto 1 de $P_{1,3f}$, para diferenciar dos casos anteriores de haste com um único furo ($P_{1,u}$) e com 2 furos ($P_{1,s}$), tem-se:

$$\frac{P_{1,3f}}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + \Delta h_{\text{saída}} = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + 1,03 \cdot \frac{V_s^2}{2g} \quad \text{Equação 6.32}$$

$$\frac{P_{1,3f}}{\gamma} = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + 0,03 \cdot \frac{V_s^2}{2g} \quad \text{Equação 6.33}$$

A equação 6.33 permite uma comparação fácil com a leitura da sonda de 2 (dois) furos em que:

$$\frac{P_{1,s}}{\gamma} + \frac{V_{s,2f}^2}{2g} = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + 1,03 \cdot \frac{V_{s,2f}^2}{2g} \quad \text{Equação 6.34}$$

$$\frac{P_{1,2f}}{\gamma} = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + 0,03 \cdot \frac{V_{s,2f}^2}{2g} \quad \text{Equação 6.35}$$

Considerando que $V_{s,2f} = 2 \cdot V_{s,3f}$, vem:

$$\frac{P_{1,2f}}{\gamma} = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + 4 \times 0,03 \cdot \frac{V_{s,3f}^2}{2g} \quad \text{Equação 6.36}$$

Com as equações 6.33 e 6.36, lembrando que V_s na equação 6.33 é o que ocorre para o caso de haste com 3 (três) furos ($V_s = V_{s,3f}$), tem-se:

$$\Delta l_{2-3} = \frac{P_{1,2f} - P_{1,3f}}{\gamma} = 3 \times 0,03 \cdot \frac{V_{s,3f}^2}{2g}$$

Equação 6.37

A equação 6.37 demonstra que a colocação do 3º furo, mesmo em um perfil simétrico, irá alterar a leitura do transdutor, tornando-a menor.

Para analisar numericamente o efeito da variação de leitura indicado pela equação 6.37 foi conduzida uma avaliação numérica, mostrada nas figuras 38 e 39 onde se utilizou os mesmos valores adotados para 2 (dois) furos, isto é, adotou-se inicialmente 4 (quatro) valores de V_2 (2,0; 2,2; 2,6; 2,8m/s) com ($V_2 - V_1$) variando entre 0,0 e 1,0m/s.

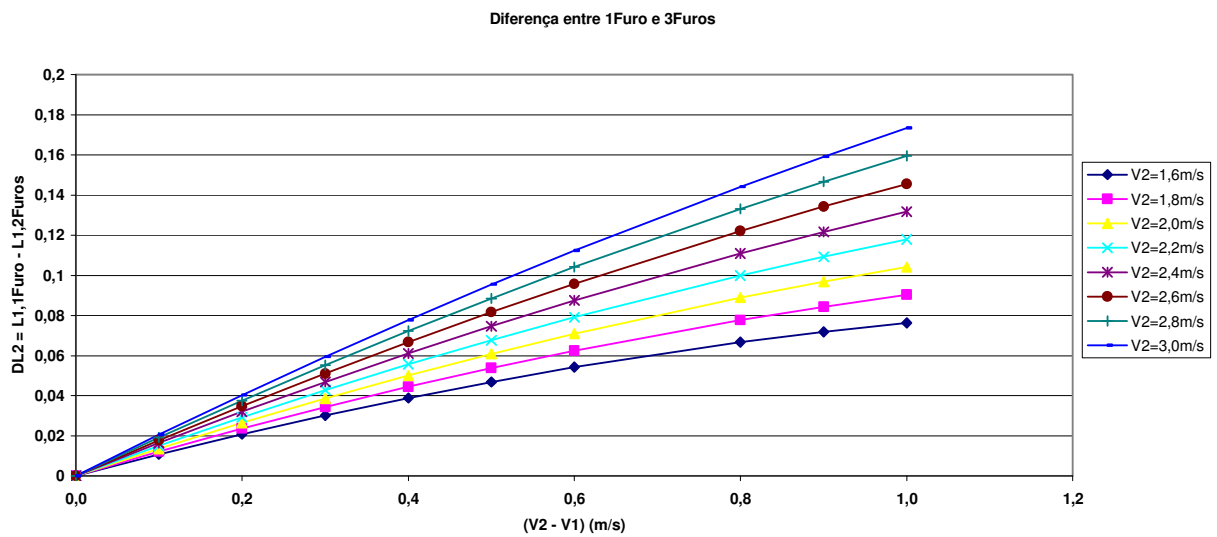


Figura 38 – Curvas da influência de mais de uma tomada de pressão na sonda em função da variação de ($V_2 - V_1$) na equação 6.37.

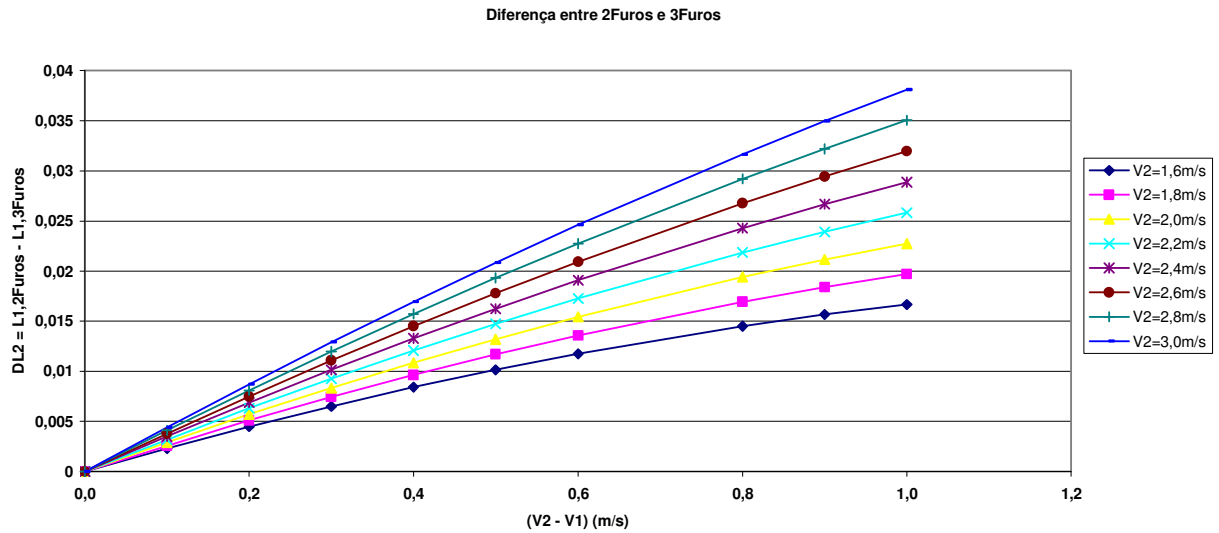


Figura 39 – Curvas da influência de mais de uma tomada de pressão na sonda em função da variação de $(V_2 - V_1)$ na equação 6.37

Para trabalhos futuros fica a sugestão para que se faça simulações variando o número de Reynolds, a geometria das tomadas de pressão, procurando criar modelos matemáticos que rejam o fluxo de fluido no interior da haste.

6.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os dados obtidos em campo na instalação do Alto ETA, com a haste de 1 furo instalada no TAP_2 simétrico e haste de 7 furos instalada no TAP_1 assimétrico, são apresentados na tabela 1.

A tabela 2 apresenta os dados obtidos na posição alternativa dos medidores, ou seja, com a haste de 1 furo instalada no TAP_1 assimétrico e haste de 7 furos instalada no TAP_2 simétrico.

Tabela 1: Dados obtidos em campo com haste de 1 furo instalada no TAP_2 simétrico e haste de 7 furos instalada no TAP_1 assimétrico.

Tubo Pitot		1 Furo - Simétrico		7 Furos - Assimétrico		Transdutor Pressão Diferencial
V_{Pitot} m/s	Q_{Pitot} m ³ /h	$Q_{Medidor}$ m ³ /h	$\Delta P_{Medidor}$ mca	$Q_{Medidor}$ m ³ /h	$\Delta P_{Medidor}$ mca	
0,33	18,5	19,7	0,00700	17,8	0,00433	A
0,48	27,01	27,64	0,01241	26	0,00870	A
0,82	46,47	47,82	0,04119	44,9	0,03130	A
1,31	73,82	67,64	0,17040	76	0,13700	B
1,59	89,72	90,33	0,22130	93	0,17300	B
1,76	99,35	107,9	0,25580	106	0,20900	B
1,98	112,05	119,07	0,30810	117	0,24900	B
2,27	128,46	131,44	0,38370	133	0,31900	B
2,53	143,13	144,52	0,45740	145	0,37800	B
3,14	177,13	172,12	0,65300	175	0,54700	B

Tabela 2: Dados obtidos em campo com haste de 1 furo instalada no TAP_1 assimétrico e haste de 7 furos instalada no TAP_2 simétrico.

Tubo Pitot		1 Furo - Assimétrico		7 Furos - Simétrico		Transdutor Pressão Diferencial
V_{Pitot} m/s	Q_{Pitot} m ³ /h	$Q_{Medidor}$ m ³ /h	$\Delta P_{Medidor}$ mca	$Q_{Medidor}$ m ³ /h	$\Delta P_{Medidor}$ mca	
0,35	19,9	19,98	0,00194	19,58	0,00604	C
0,58	32,65	34,12	0,00523	33,9	0,03114	C
0,81	45,96	49,94	0,01158	44,06	0,03410	C
1,2	67,84	62,31	0,04425	66,6	0,12800	D
1,71	96,77	100,94	0,07541	98,74	0,20900	D
2,16	129,65	128,94	0,10039	127,68	0,31000	D
2,44	137,66	143,16	0,12527	141	0,37700	D
2,63	148,48	152,08	0,15861	151,49	0,44000	D
2,8	157,79	166,45	0,16372	158,5	0,47100	D
2,98	168,22	172,39	0,18642	173,1	0,56500	D

Os dados de vazão – Q_{medidor} e deflexão - $\Delta P_{\text{medidor}}$ que foram obtidos em campo e que constam das tabelas 1 e 2, foram indicados nos seguintes elementos secundários:

- Transdutor de pressão diferencial A - certificado de calibração número 230670-06 (anexo 4);
- Transdutor de pressão diferencial B - certificado de calibração número 230675-06 (anexo 5);
- Transdutor de pressão diferencial C - certificado de calibração número 230673-06 (anexo 6);
- Transdutor de pressão diferencial D - certificado de calibração número 196267-04 (anexo 7).

As tabelas 3 e 4 a seguir apresentam os dados das tabelas 1 e 2 separados por sonda, contendo ainda os valores auxiliares usados na análise dos resultados.

Tabela 3: $Q = f(\Delta P)$ e $Q = f(\sqrt{\Delta P})$ para haste de 1furo.

1 Furo - Assimétrico						1 Furo - Simétrico					
V_{Pitot} m/s	Q_{Pitot} m ³ /h	Q m ³ /h	ΔP mmH ₂ O	ΔP mca	$\sqrt{\Delta P}$ m ^{0,5}	V_{Pitot} m/s	Q_{Pitot} m ³ /h	Q m ³ /h	ΔP mmH ₂ O	ΔP mca	$\sqrt{\Delta P}$ m ^{0,5}
0,35	19,90	19,98	1,94	0,001940	0,0440	0,33	18,50	19,70	7,00	0,007000	0,0837
0,58	32,65	34,12	5,23	0,005230	0,0723	0,48	27,01	27,64	12,41	0,012410	0,1114
0,81	45,96	49,94	11,58	0,011580	0,1076	0,82	46,47	47,82	41,19	0,041190	0,2030
1,20	67,84	62,31	44,25	0,044250	0,2104	1,31	73,82	67,64	170,40	0,170400	0,4128
1,71	96,77	100,94	75,41	0,075410	0,2746	1,59	89,72	90,33	221,30	0,221300	0,4704
2,16	129,65	128,94	100,39	0,100390	0,3168	1,76	99,35	107,90	255,80	0,255800	0,5058
2,44	137,66	143,16	125,27	0,125270	0,3539	1,98	112,05	119,07	308,10	0,308100	0,5551
2,63	148,48	152,08	158,61	0,158610	0,3983	2,27	128,46	131,44	383,70	0,383700	0,6194
2,80	157,79	166,45	163,72	0,163720	0,4046	2,53	143,13	144,52	457,40	0,457400	0,6763
2,98	168,22	172,39	186,42	0,186420	0,4318	3,14	177,13	172,12	653,00	0,653000	0,8081

Tabela 4: $Q = f(\Delta P)$ e $Q = f(\sqrt{\Delta P})$ para haste de 7furos.

7 Furos - Assimétrico						7 Furos - Simétrico					
V_{Pitot} m/s	Q_{Pitot} m ³ /h	Q m ³ /h	ΔP mmH ₂ O	ΔP mca	$\sqrt{\Delta P}$ m ^{0,5}	V_{Pitot} m/s	Q_{Pitot} m ³ /h	Q m ³ /h	ΔP mmH ₂ O	ΔP mca	$\sqrt{\Delta P}$ m ^{0,5}
0,33	18,50	17,80	4,33	0,004330	0,0658	0,35	19,90	19,58	6,04	0,006040	0,0777
0,48	27,01	26,00	8,70	0,008700	0,0933	0,58	32,65	33,90	31,14	0,031140	0,1765
0,82	46,47	44,90	31,30	0,031300	0,1769	0,81	45,96	44,06	34,10	0,034100	0,1847
1,31	73,82	76,00	137,00	0,137000	0,3701	1,20	67,84	66,60	128,00	0,128000	0,3578
1,59	89,72	93,00	173,00	0,173000	0,4159	1,71	96,77	98,74	209,00	0,209000	0,4572
1,76	99,35	106,00	209,00	0,209000	0,4572	2,16	129,65	127,68	310,00	0,310000	0,5568
1,98	112,05	117,00	249,00	0,249000	0,4990	2,44	137,66	141,00	377,00	0,377000	0,6140
2,27	128,46	133,00	319,00	0,319000	0,5648	2,63	148,48	151,49	440,00	0,440000	0,6633
2,53	143,13	145,00	378,00	0,378000	0,6148	2,80	157,79	158,50	471,00	0,471000	0,6863
3,14	177,13	175,00	547,00	0,547000	0,7396	2,98	168,22	173,10	565,00	0,565000	0,7517

Com os dados das tabelas 3 e 4 foram construídas as quatro curvas da função $Q = f(\Delta P)$, apresentadas nas figuras 40, 41, 42 e 43. Essas figuras apresentam o comportamento das sondas com relação a equações de regressão exponencial.

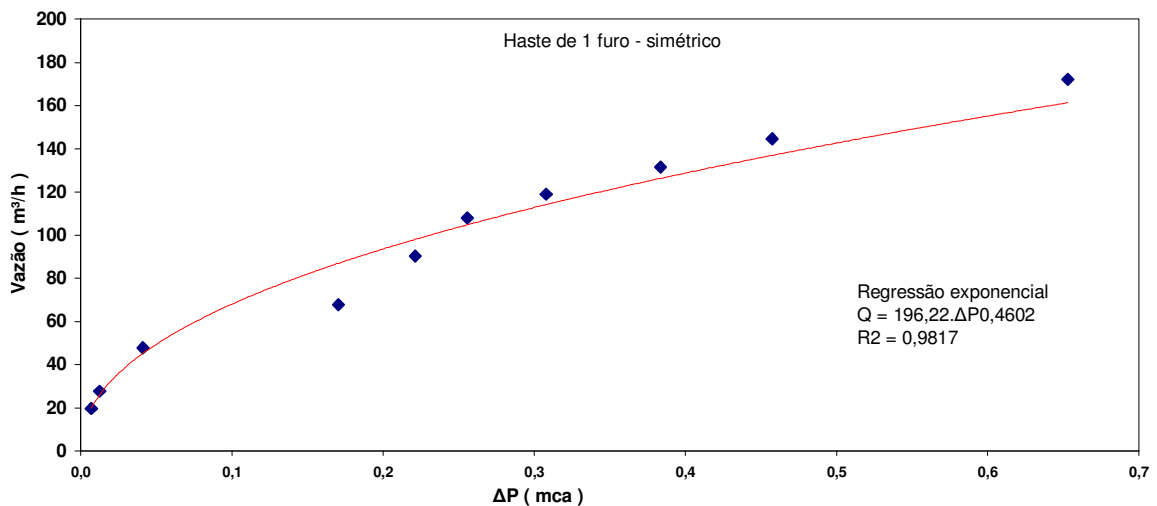


Figura 40 – Regressão exponencial para haste de 1 furo instalada no TAP_2 simétrico - $Q = f(\Delta P^b)$.

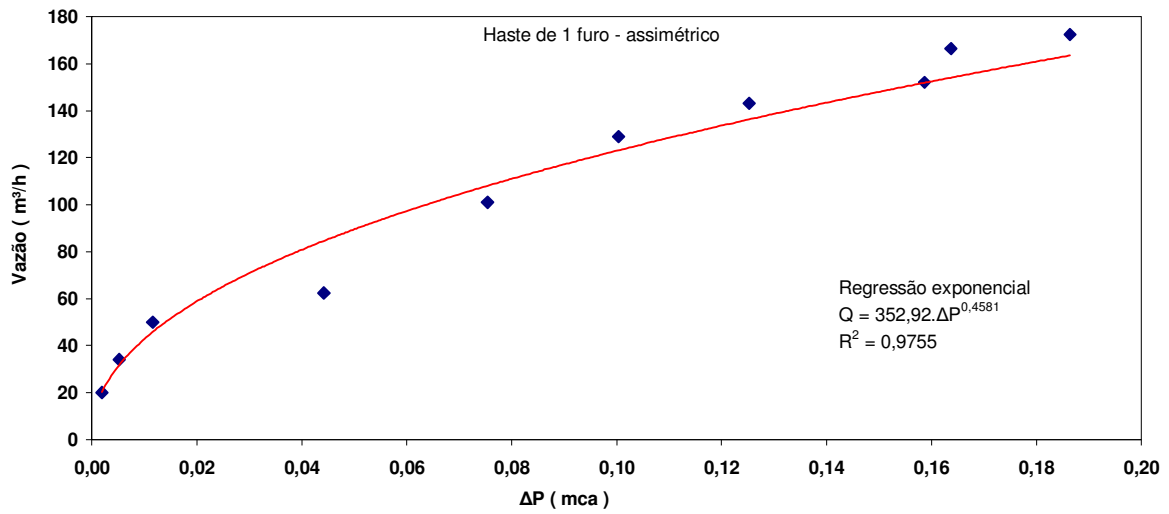


Figura 41 – Regressão exponencial para haste de 1 furo instalada no TAP_1 assimétrico - $Q = f(\Delta P^b)$.

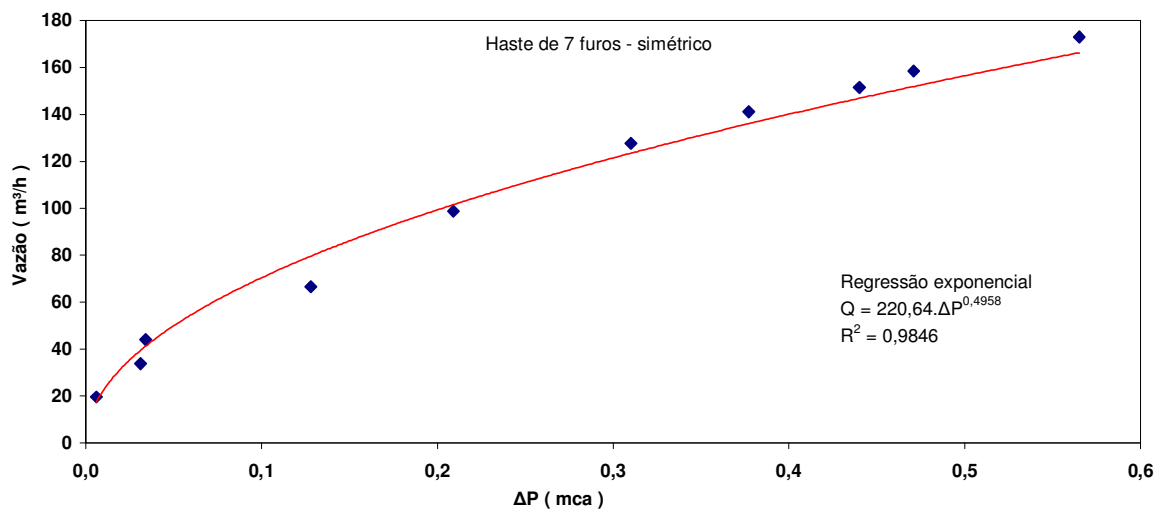


Figura 42 – Regressão exponencial para haste de 7 furos instalada no TAP_2 simétrico - $Q = f(\Delta P^b)$.

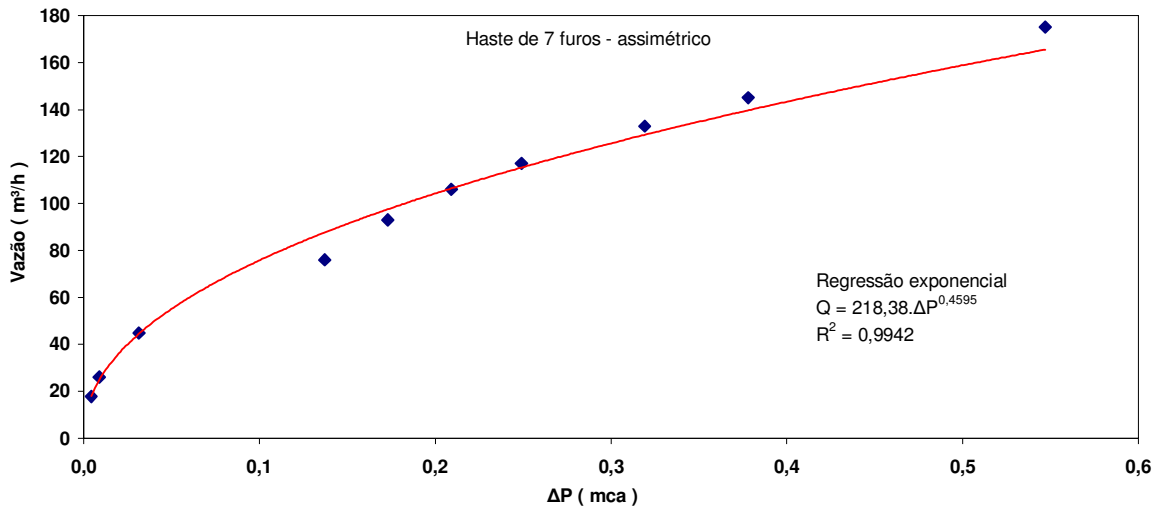


Figura 43 – Regressão exponencial para haste de 7 furos instalada no TAP_1 assimétrico - $Q = f(\Delta P^b)$.

Com os dados das tabelas 3 e 4 foram construídas também as curvas da função $Q = f(\sqrt{\Delta P})$, apresentadas nas figuras 44,45,46 e 47. Essas figuras apresentam o comportamento das sondas com relação a equações de regressão linear.

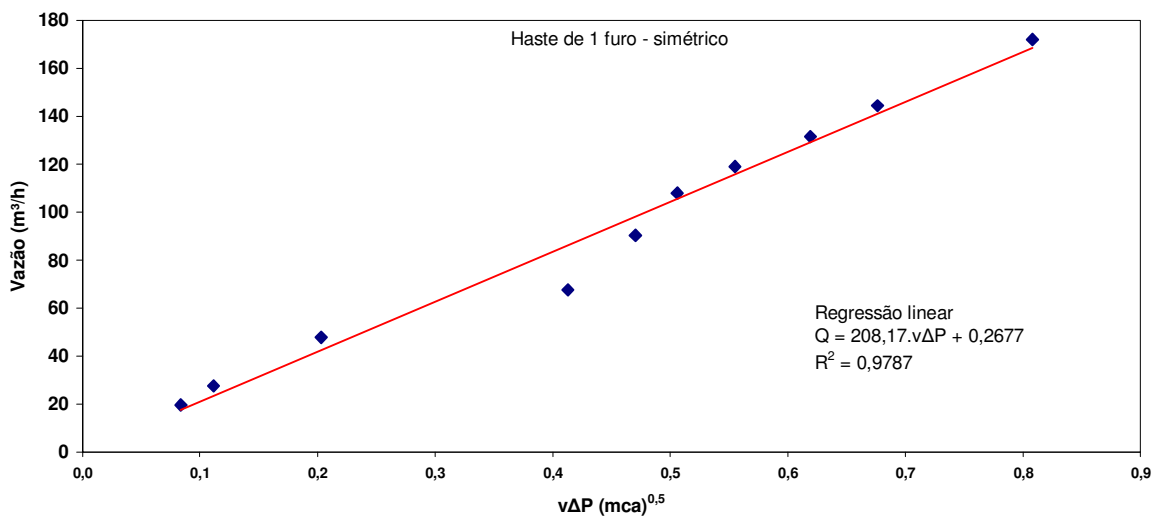


Figura 44 – Regressão linear para haste de 1 furo instalada no TAP_2 simétrico - $Q = f(\sqrt{\Delta P})$.

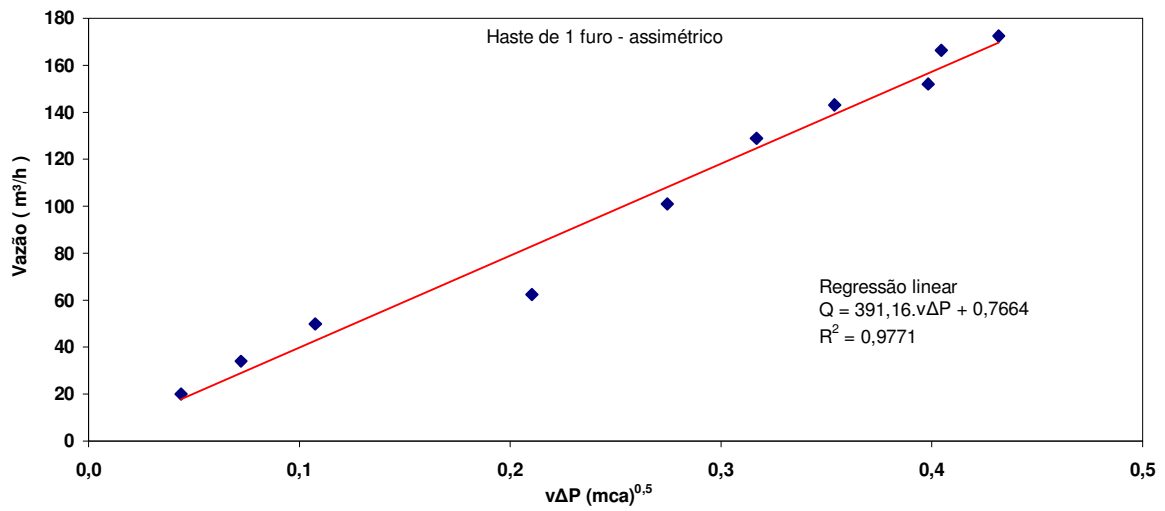


Figura 45 – Regressão linear para haste de 1 furo instalada no TAP_1 assimétrico - $Q = f(\sqrt{\Delta P})$.

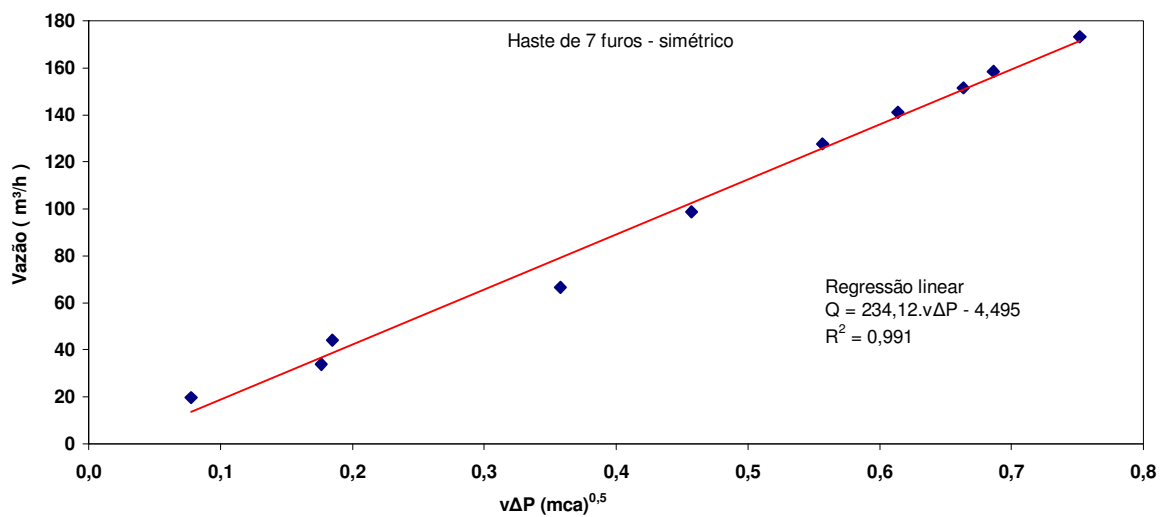


Figura 46 – Regressão linear para haste de 7 furos instalada no TAP_2 simétrico - $Q = f(\sqrt{\Delta P})$.

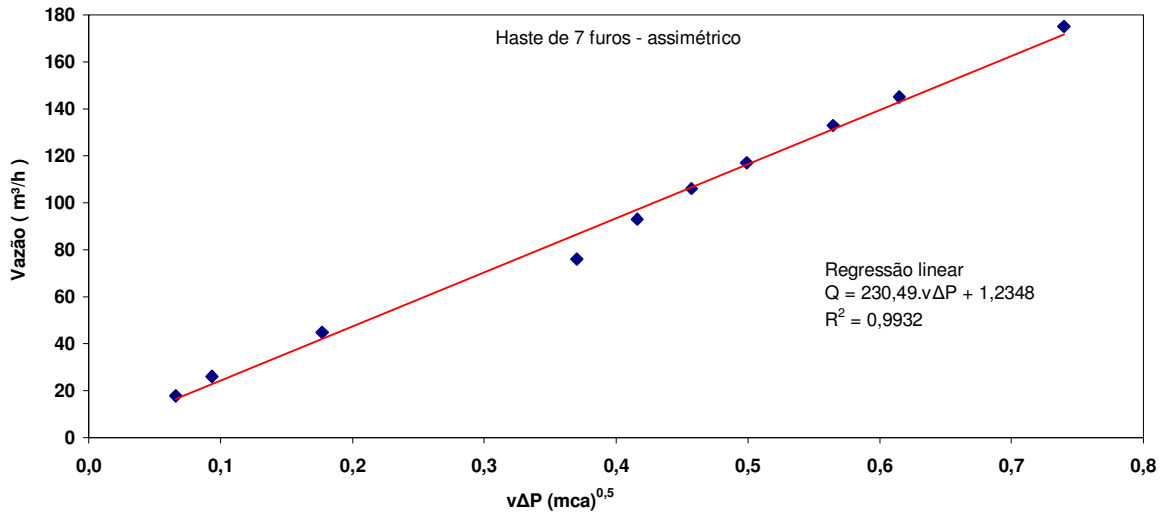


Figura 47 – Regressão linear para haste de 7 furos instalada no TAP_1 assimétrico - $Q = f(\sqrt{\Delta P})$.

Tabela 5: Valores que serão utilizados na tabela 9 para determinação dos limites de erros nas equações de utilização do instrumento.

Haste 1 furo TAP_1 Assimétrico	Haste 1 furo TAP_2 Simétrico	Haste 7 furos TAP_1 Assimétrico	Haste 7 furos TAP_2 Simétrico
N = 10	N = 10	N = 10	N = 10
$S_y = 2,605398$	$S_y = 4,147349$	$S_y = 3,332578$	$S_y = 2,119705$
$\Sigma Y_i = 968,00$	$\Sigma Y_i = 860,54$	$\Sigma Y_i = 857,70$	$\Sigma Y_i = 948,05$
$\Sigma Y_i^2 = 131918,81$	$\Sigma Y_i^2 = 105206,19$	$\Sigma Y_i^2 = 105921,85$	$\Sigma Y_i^2 = 127441,72$
$S_m^2 = 0,000068$	$S_m^2 = 0,000133$	$S_m^2 = 0,000103$	$S_m^2 = 0,000056$
$S_m = 0,008257$	$S_m = 0,011538$	$S_m = 0,010149$	$S_m = 0,007512$
99,7% $3S_m = 0,0248$	$3S_m = 0,0346$	$3S_m = 0,0304$	$3S_m = 0,0225$
50% $0,674S_m = 0,0056$	$0,674S_m = 0,0078$	$0,674S_m = 0,0068$	$0,674S_m = 0,0051$
$S_b^2 = 2,343177$	$S_b^2 = 1,400580$	$S_b^2 = 1,090934$	$S_b^2 = 0,719184$
$S_b = 1,530744$	$S_b = 1,183461$	$S_b = 1,044478$	$S_b = 0,848047$
99,7% $3S_b = 4,5922$	$3S_b = 3,5504$	$3S_b = 3,1334$	$3S_b = 2,5441$
50% $0,674S_b = 1,0317$	$0,674S_b = 0,7977$	$0,674S_b = 0,7040$	$0,674S_b = 0,5716$

Com os dados de vazão do padrão de referência (Q_{Pitot}) e da vazão do medidor investigado, apresentados nas tabelas 3 e 4, foram elaborados os gráficos de dispersão de valores da calibração do instrumento pelo procedimento simplificado (item 5.3), sendo os resultados apresentados nas figuras 48,49,50 e 51.

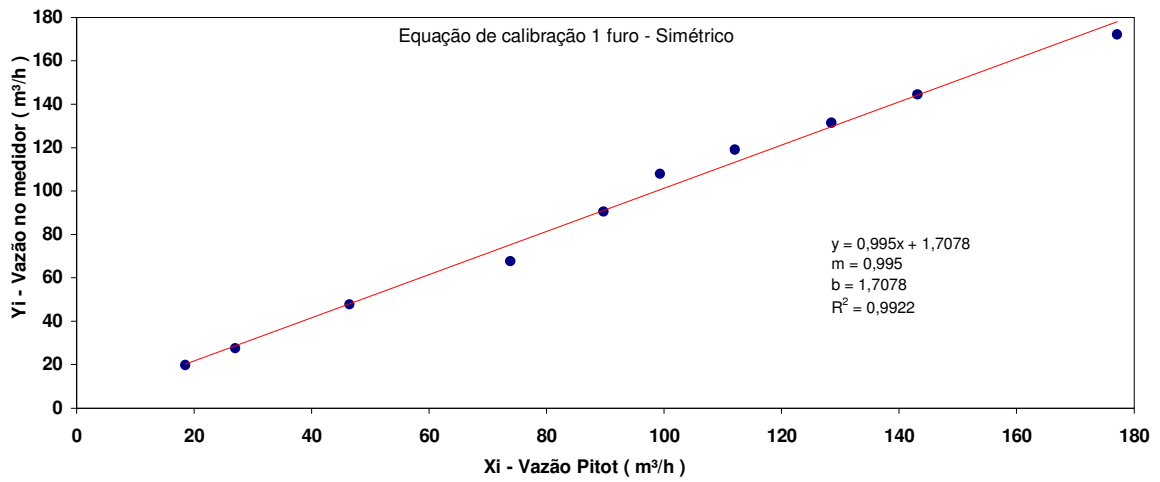


Figura 48 – Dispersão dos valores para haste de 1 furo instalada no TAP_2 simétrico.

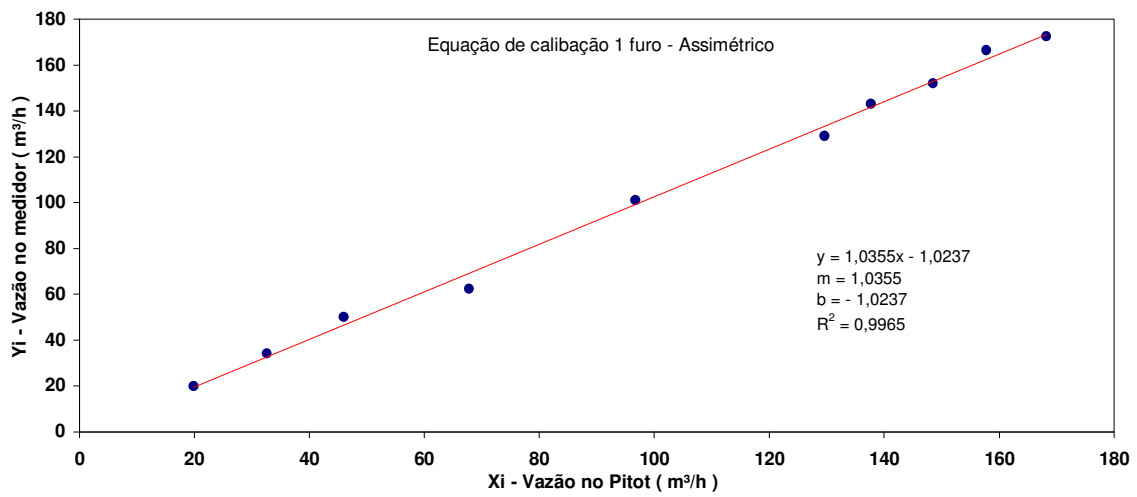


Figura 49 – Dispersão dos valores para haste de 1 furo instalada no TAP_1 assimétrico.

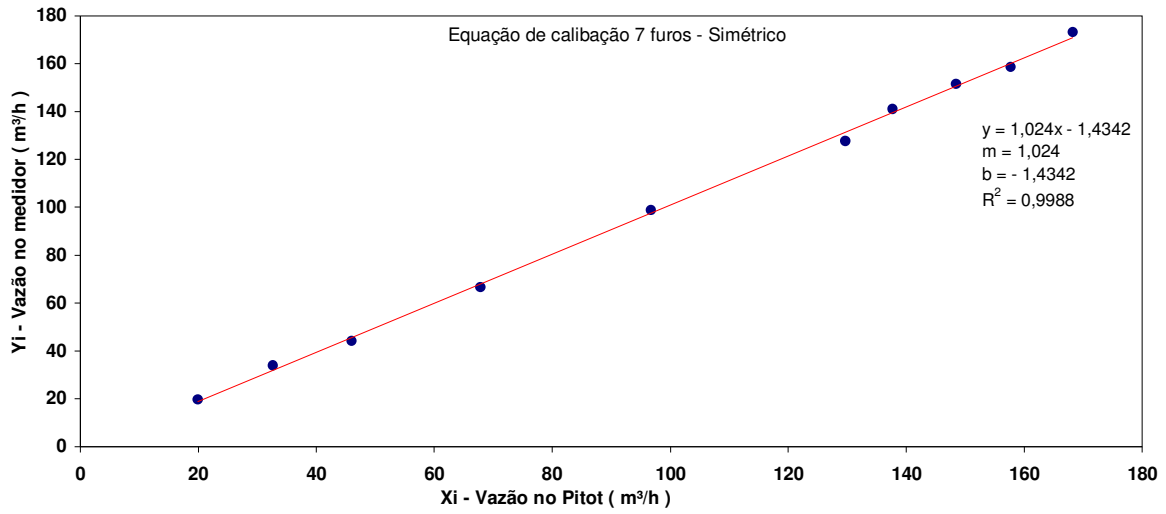


Figura 50 – Dispersão dos valores para haste de 7 furos instalada no TAP_2 simétrico.

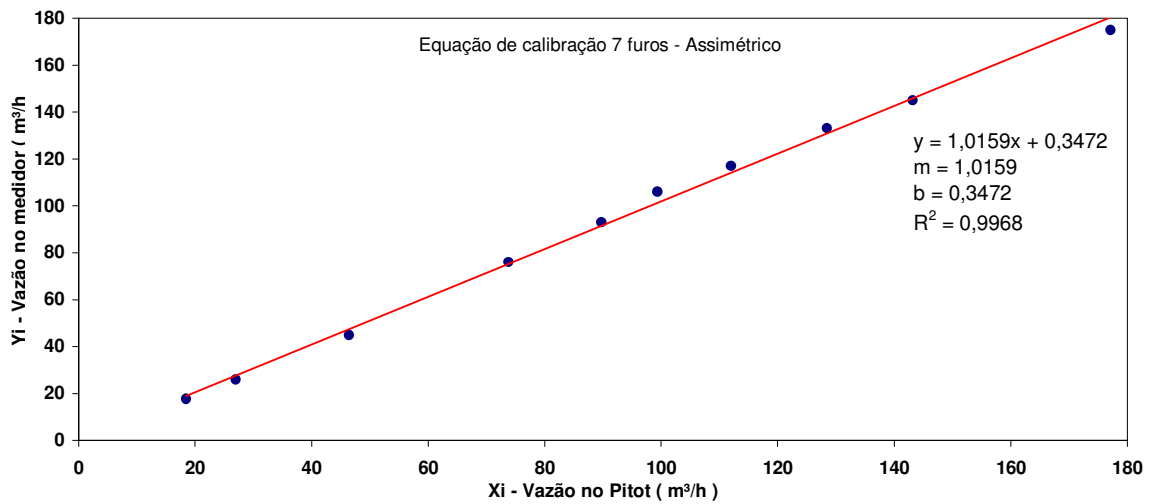


Figura 51 – Dispersão dos valores para haste de 7 furos instalada no TAP_1 assimétrico.

A tabela 6 apresenta as equações de correção da indicação de vazão do medidor, com seus limites de erro, nas quatro situações ensaiadas no Alto ETA.

Tabela 6: Equações da correlação entre as vazões reais (x) e as leituras de vazão do instrumento (y) com os limites de erro.

EQUAÇÃO DE CALIBRAÇÃO $y = mx + b$												
1 Furo - Assimétrico				1 Furo - Simétrico			7 Furos - Assimétrico			7 Furos - Simétrico		
	$R^2 = 0,9965$	$m = 1,0355$	$b = -1,0237$	$R^2 = 0,9922$	$m = 0,995$	$b = 1,7078$	$R^2 = 0,9968$	$m = 1,0159$	$b = 0,3472$	$R^2 = 0,9988$	$m = 1,024$	$b = -1,4342$
99,7%	$m \pm 0,0248$			$m \pm 0,0346$			$m \pm 0,0304$			$m \pm 0,0225$		
	$b \pm 4,5922$			$b \pm 3,5504$			$b \pm 3,1334$			$b \pm 2,5441$		
50%	$m \pm 0,0056$			$m \pm 0,0078$			$m \pm 0,0068$			$m \pm 0,0051$		
	$b \pm 1,0317$			$b \pm 0,7977$			$b \pm 0,7040$			$b \pm 0,5716$		

Tabela 7: Equações de utilização do instrumento com os limites de erro:
x = vazão real; y = vazão indicada pelo instrumento.

EQUAÇÃO DE UTILIZAÇÃO												
1 Furo - Assimétrico				1 Furo - Simétrico			7 Furos - Assimétrico			7 Furos - Simétrico		
		$m = 1,0355$	$b = -1,0237$		$m = 0,995$	$b = 1,7078$		$m = 1,0159$	$b = 0,3472$		$m = 1,024$	$b = -1,4342$
	$S_x^2 = 6,330646$			$S_x^2 = 17,373804$			$S_x^2 = 10,761149$			$S_x^2 = 4,285001$		
	$S_x = 2,516077486$			$S_x = 4,168189483$			$S_x = 3,280418956$			$S_x = 2,070024452$		
	$3S_x = 7,5482$			$3S_x = 12,5046$			$3S_x = 9,8413$			$3S_x = 6,2101$		
	$0,674S_x = 1,6958$			$0,674S_x = 2,8094$			$0,674S_x = 2,2110$			$0,674S_x = 1,3952$		
99,7%	$x = ((y - b)/m) \pm 7,5482$			$x = ((y - b)/m) \pm 12,5046$			$x = ((y - b)/m) \pm 9,8413$			$x = ((y - b)/m) \pm 6,2101$		
50%	$x = ((y - b)/m) \pm 1,6958$			$x = ((y - b)/m) \pm 2,8094$			$x = ((y - b)/m) \pm 2,2110$			$x = ((y - b)/m) \pm 1,3952$		

Tabela 8: Curvas de regressão Linear e exponencial.

CURVAS DE REGRESSÃO LINEAR E EXPONENCIAL		
Instalação	Regressão Linear	Regressão Exponencial
1 Furo - Simétrico	$Q = 208,17 \cdot \sqrt{\Delta P} + 0,2677$ $R^2 = 0,9787$	$Q = 196,22 \cdot \Delta P^{0,4602}$ $R^2 = 0,9817$
1 Furo - Assimétrico	$Q = 391,16 \cdot \sqrt{\Delta P} + 0,7664$ $R^2 = 0,9771$	$Q = 352,92 \cdot \Delta P^{0,4581}$ $R^2 = 0,9755$
7 Furos - Simétrico	$Q = 234,12 \cdot \sqrt{\Delta P} - 4,495$ $R^2 = 0,991$	$Q = 220,64 \cdot \Delta P^{0,4958}$ $R^2 = 0,9846$
7 Furos - Assimétrico	$Q = 230,49 \cdot \sqrt{\Delta P} + 1,2348$ $R^2 = 0,9932$	$Q = 218,38 \cdot \Delta P^{0,4595}$ $R^2 = 0,9942$

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO

A proposta de avaliar um medidor de vazão com baixa incerteza, baixo custo, para grandes diâmetros, facilidade de instalação e manutenção surgiu para atender a dissertação no curso de mestrado em questão e teve como incentivo um curso de treinamento em macromedição na Sabesp, realizado pelo IPT na cidade de Lins em junho de 2003, associado à deficiência de macromedições nos sistemas de abastecimentos públicos, bem como o custo elevado para aquisições de medidores existentes e as dificuldades para instalá-los.

Considerou-se útil contemplar neste trabalho, uma breve comparação de custos entre os medidores de vazão mais difundidos atualmente no mercado e o medidor investigado.

Foram levantados os custos dos medidores de vazão para os diâmetros de 100mm, 200mm, 300mm, 500mm e 800mm, considerando as marcas mais utilizadas e incluindo o custo do acessório necessário para sua montagem e operação, conforme quadro 2.

Não consta no quadro 2 abaixo o preço do medidor ultrassônico, por apresentar custo elevado e pouco preferido pelos usuários de macromedidores.

Quadro 2 – Preços de alguns medidores difundidos nas Companhias de Saneamento comparados com o medidor objeto deste trabalho.

DIÂMETRO	ELETROMAGNÉTICO	ANNUBAR	MEDIDOR INVESTIGADO
100 mm	R\$ 8.900,00	R\$ 6.429,00	R\$ 3.000,00
200 mm	R\$ 10.450,00	R\$ 6.620,00	R\$ 3.050,00
300 mm	R\$ 12.900,00	R\$ 6.859,00	R\$ 3.150,00
500 mm	R\$ 18.550,00	R\$ 7.552,00	R\$ 3.300,00
800 mm	R\$ 37.400,00	R\$ 10.202,00	R\$ 3.500,00

COMPOSIÇÃO DO CUSTO: MEDIDOR (PRIMÁRIO), INDICADOR (SECUNDÁRIO), FONTE E ACESSÓRIOS DE INSTALAÇÃO

Atualmente o medidor de vazão mais utilizado pelas companhias de saneamento do Brasil é o eletromagnético, seguido pelo medidor do tipo Annubar e ultrassônico que aos poucos tem tomado o lugar dos medidores do tipo turbina de inserção, no *ranking* de aplicação.

A superação do medidor do tipo turbina de inserção se deve ao fato do mesmo apresentar prematuramente grande incidência de problemas de travamento de suas pás, indicando leituras cada vez menores.

O medidor investigado neste trabalho foi testado em água tratada, com ausência de sólidos em suspensão e em pressões que variaram de 2 mca a 150 mca, situações nas quais, apresentaram bom desempenho.

Serão discutidos a seguir cinco aspectos importantes que permitirão caracterizar as leis que regem o medidor investigado em sua condição mais eficaz:

- Qual o melhor valor de “b” na expressão da vazão $Q = K \cdot (\Delta P)^b$?
- Qual utilização é mais vantajosa, o medidor de 7 furos ou de 1 furo?
- Como o medidor de 1 furo se comportará se calibrado em *TAP* com perfil de velocidade simétrico e utilizado em *TAP* com perfil assimétrico?
- Como o medidor de 7 furos se comportará se calibrado em *TAP* com perfil de velocidade simétrico e utilizado em *TAP* com perfil assimétrico?
- Quando não for possível efetuar a calibração do medidor no seu ponto de trabalho efetivo, qual medidor, 1 furo ou 7 furos, terá melhor eficiência ao se utilizar uma calibragem usual, efetuada em um ponto com condições hidráulicas favoráveis?

- Discussão 1 – Qual o melhor valor de “b” na expressão da vazão $Q = K \cdot \Delta P^b$?

Da equação da continuidade ou conservação da massa de um fluido que circula em uma tubulação de seção A_1 com velocidade v_1 em um trecho e A_2 com velocidade v_2 em outro trecho, sabemos que $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \text{constante}$ e denominado de fluxo volumétrico ou vazão volumétrica. Fazendo $\beta = \frac{D_2}{D_1}$

$$\beta^2 = \frac{A_2}{A_1}$$

$$\beta^2 = \frac{v_1}{v_2}$$

$$v_1 = \beta^2 \cdot v_2$$

Equação 2

Na equação de Bernoulli um fluido sem viscosidade, se desloca sem atrito e portanto sem perdas de energia e se considerarmos $h_1 = h_2$ temos:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

Equação 3

Com a equação I em II, vem:

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{v_2^2 - (\beta^2 \cdot v_2)^2}{2g}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma(1 - \beta^4)}} \cdot 2g \text{ fazendo } \sqrt{\frac{1}{(1 - \beta^4)}} = T$$

$$v_2 = T \cdot \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \cdot 2g} \text{ e } v_1 = \beta^2 \cdot v_2$$

$$v_1 = \beta^2 \cdot T \cdot \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \cdot 2g}$$

Esta equação acima é teórica e considera as velocidades v_2 e v_1 uniformemente distribuídas, sendo portanto necessário fazer uma correção, introduzindo um coeficiente de descarga “c” que considera todos os elementos de um escoamento real e que depende do tipo da haste do medidor, tipo das tomadas de pressão, diâmetro da tubulação, Número de Reynolds e da relação β .

$$c = \frac{Q_{real}}{Q_{teórica}}$$

$$Q_{real} = c \cdot Q_{teórica} \text{ e } Q_{teórica} = A_1 \cdot v_1$$

$$Q_{real} = c \cdot A_1 \cdot \beta^2 \cdot T \cdot \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \cdot 2g} \text{ como } c, A_1, \beta^2, T, \gamma \text{ e } g \text{ são constantes,}$$

podemos reduzir a equação para $Q = K \cdot \sqrt{\Delta P}$.

Como demonstrado acima a potência de ΔP na equação da vazão, deduzida é definida como sendo 0,5.

Na tabela 8, a expressão que apresentou um expoente de ΔP mais próximo de 0,5 foi $Q = 220,64 \cdot \Delta P^{0,4958}$, obtido na instalação com haste de 7 furos no TAP₂ simétrico, indicando o expoente 0,4958 como o melhor valor para “b” na expressão $Q = K \cdot \Delta P^b$.

Os valores ficaram bem próximos de 0,5 em todas as situações testadas, indicando que a forma e a geometria adotadas na construção dos orifícios não afetaram a leitura de maneira sensível, na prática.

- Discussão 2 – Qual utilização é mais vantajosa, o medidor de 7 furos ou de 1 furo?

Com base nas tabelas 6 e 7, estaremos investigando a seguir os desvios encontrados e selecionando através de discussões em torno do menor erro, a haste com a maior eficiência e melhor performance de aplicação.

Segundo o VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia (1998), medição é o conjunto de operações que tem por objetivo determinar o valor de uma grandeza.

Entende-se portanto que os valores medidos devem ser considerados em concordância com os limites de erros obtidos, conforme mostrado na tabela 9 abaixo.

Tabela 9: Limites de erros das equações de calibração e utilização do medidor investigado.

GAUSS	Erros	EQUAÇÃO DE CALIBRAÇÃO - ERROS				
		1 furo Assimétrico	1 furo Simétrico	7 furos Assimétrico	7 furos Simétrico	Menor erro
99,7%	erro de m	± 0,0330	± 0,0428	± 0,0339	± 0,0253	± 0,0253
	erro de b	± 7,2845 m ³ /h	± 4,4794 m ³ /h	± 3,5807 m ³ /h	± 2,9048 m ³ /h	± 2,9048 m ³ /h
50%	erro de m	± 0,0074	± 0,0096	± 0,0076	± 0,0057	± 0,0057
	erro de b	± 1,6366 m ³ /h	± 1,0064 m ³ /h	± 0,8045 m ³ /h	± 0,6526 m ³ /h	± 0,6526 m ³ /h
GAUSS	Erros	EQUAÇÃO DE UTILIZAÇÃO - ERROS				
		1 furo Assimétrico	1 furo Simétrico	7 furos Assimétrico	7 furos Simétrico	Menor erro
99,7%	erro de x	± 7,5482 m ³ /h	± 12,5046 m ³ /h	± 9,8413 m ³ /h	± 6,2101 m ³ /h	± 6,2101 m ³ /h
50%	erro de x	± 1,6958 m ³ /h	± 2,8094 m ³ /h	± 2,211 m ³ /h	± 1,3952 m ³ /h	± 1,3952 m ³ /h

Como se pode concluir pela relação de erros acima, a haste que apresentou o menor desvio tanto na equação de calibração como na de utilização foi a haste de sete furos e seu melhor desempenho foi observado no TAP_2 cujo perfil de velocidade é simétrico.

Nas discussões 3, 4 e 5 a seguir lançaremos mão da comparação das equações de utilização do instrumento investigado, mostradas na tabela 9 e adotaremos o caso de três desvios padrão da média (3S); pois este intervalo

de confiança é bastante suficiente, significativo e abriga 99,7% dos dados colhidos no campo.

- Discussão 3 – Como o medidor com haste de 1 furo se comportará quando calibrado em *TAP* com perfil de velocidade simétrico e utilizado em *TAP* com perfil de velocidade assimétrico?

Tabela 10: Equações de utilização do medidor investigado.

Nível de significância 3S ≅ 99,7%				
INSTALAÇÃO	EQUAÇÃO DE UTILIZAÇÃO	COEFICIENTE R ²	RESÍDUOS (S _x)	LIMITES DE ERRO
1 FURO - SIMÉTRICO	$x (m^3/h) = ((y - 1,7078) / 0,995)$	0,9922	4,1682	± 12,5046 m ³ /h
1 FURO - ASSIMÉTRICO	$x (m^3/h) = ((y + 1,0237) / 1,0355)$	0,9965	2,5161	± 7,5482 m ³ /h

Embora no caso do medidor com haste de 1 furo, conforme tabela 10, os coeficientes de correlação de Pearson estejam próximos de um valor forte, isto é próximo de 1 , tanto para instalações no *TAP* com perfil de velocidade simétrico quanto no *TAP* com perfil de velocidade assimétrico, podemos concluir nesta discussão que tomando como base os limites de erro, os resíduos quadráticos médios e os coeficientes de correlação, o medidor apresentou uma melhor eficiência quando instalado no *TAP* com perfil de velocidade assimétrico, mostrando com isto que é incoerente efetuar uma calibração prévia deste medidor em *TAP* com perfil de velocidade simétrico.

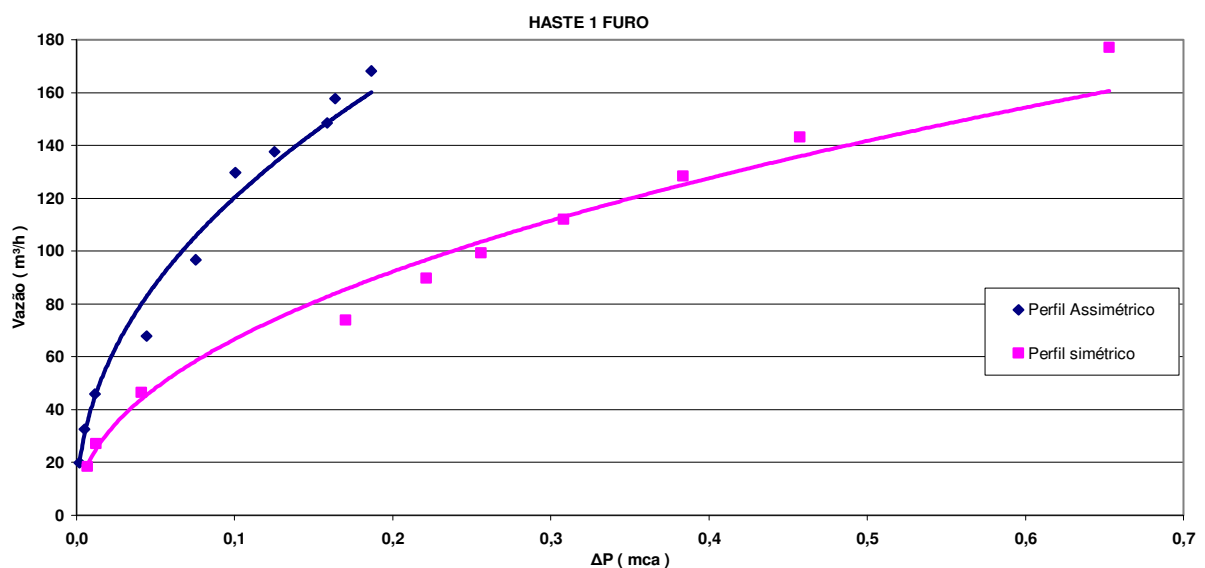


Figura 52 – Curvas experimentais obtidas com o medidor de 1 furo nas duas seções ensaiadas.

Na figura 52 acima, observa-se também que a curva de calibragem do medidor variou acentuadamente quando o perfil passou de simétrico para assimétrico, indicando que teríamos valores bem discrepantes e de baixa precisão se o mesmo fosse calibrado em *TAP* com perfil de velocidade simétrico e utilizado em *TAP* com perfil de velocidade assimétrico.

Desta forma, conclui-se que, se a instalação da haste de 1 furo em *TAP* com perfil de velocidade assimétrico for inevitável, é interessante que a calibração se faça em seu local de operação, visto que de outra forma, fatores reais externos e internos desconhecidos possam influenciar de maneira descontrolada nos valores obtidos.

- Discussão 4 – Como o medidor de 7 furos se comportará quando calibrado em *TAP* com perfil de velocidade simétrico e utilizado em *TAP* com perfil de velocidade assimétrico?

Tabela 11: Equações de utilização do medidor investigado.

Nível de significância 3S ≅ 99,7%				
INSTALAÇÃO	EQUAÇÃO DE UTILIZAÇÃO	COEFICIENTE R ²	RESÍDUOS (S _x)	LIMITES DE ERRO
7 FUROS - SIMÉTRICO	$x \text{ (m}^3\text{/h)} = ((y + 1,4342) / 1,024)$	0,9988	2,0700	± 6,2101 m ³ /h
7 FUROS - ASSIMÉTRICO	$x \text{ (m}^3\text{/h)} = ((y - 0,3472) / 1,0159)$	0,9968	3,2804	± 9,8413 m ³ /h

Neste caso em que o medidor foi montado com a haste de 7 furos, verificou-se que o coeficiente de correlação de Pearson mostrou-se mais forte, próximo de 1, na instalação do *TAP* com perfil de velocidade simétrico, o erro quadrático médio reduziu-se e a faixa do limite de erro ficou mais estreita também na instalação em *TAP* com perfil de velocidade simétrico, conforme mostra a tabela 11 acima.

A equação de utilização do medidor investigado com a haste de 7 furos, gerada no TAP_1 assimétrico expressa valores ainda confiáveis, visto que neste caso o coeficiente de correlação de Pearson mostrou-se também um valor forte;

embora o limite de erro tenha chegado a aproximadamente 50% do caso anterior.

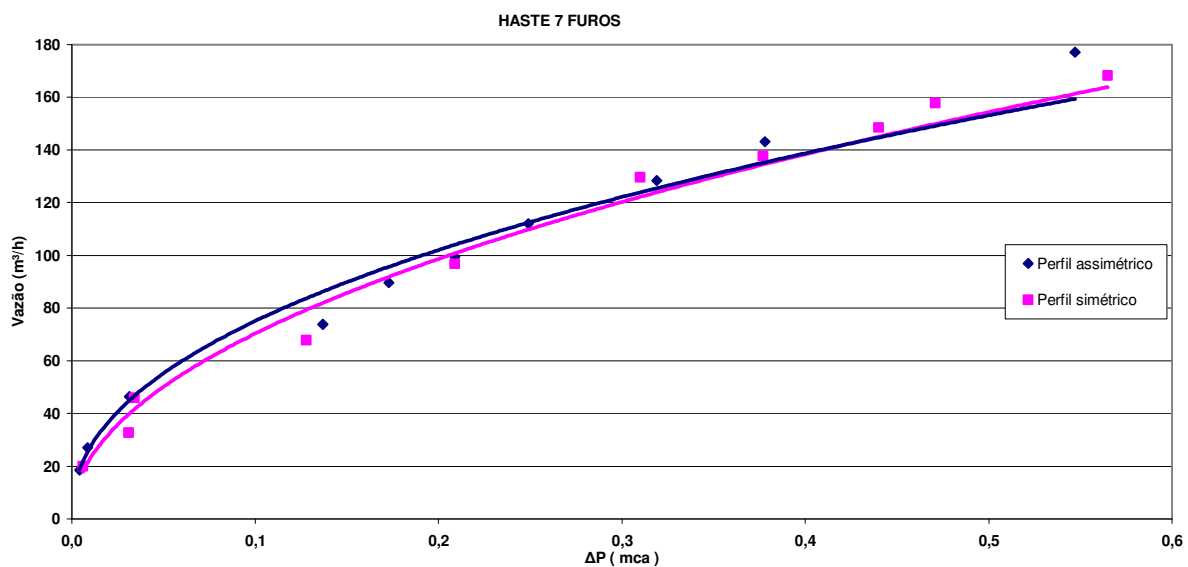


Figura 53 – Curvas experimentais obtidas com o medidor de 7 furos nas duas seções ensaiadas.

Na figura 53 acima, pode-se observar não há muita discrepância entre os valores medidos nos dois perfis ensaiados, existindo portanto a possibilidade de ser calibrado em TAP com perfil de velocidade simétrico e utilizado em TAP com perfil de velocidade assimétrico com pequeno prejuízo de acurácia.

Desta forma, conclui-se que, o ideal é calibrar e utilizar o medidor construído com haste de 7 furos em TAP com perfil de velocidade simétrico; porém quando a instalação em TAP com perfil de velocidade assimétrico for inevitável, é preferível utilizar o medidor de 7 furos cujas características contribuíram, de

alguma forma, para que a influência dos fatores externos não fosse tão acentuada como ocorre com a haste de 1 furo.

Discussão 5 – Quando não for possível efetuar a calibração do medidor no seu ponto de trabalho efetivo, qual medidor, 1 furo ou 7 furos, terá melhor eficiência ao se utilizar uma calibragem usual, efetuada em um ponto com condições hidráulicas favoráveis?

Das discussões 3 e 4 pode-se concluir que, dispondo de uma haste com a calibração usual, em perfil simétrico e quando não for possível efetuar a calibração do medidor no seu ponto de trabalho efetivo, o medidor de haste com 7 furos provavelmente terá menor erro.

Tabela 12: Equações de utilização do medidor investigado.

Nível de significância 3S \equiv 99,7%				
INSTALAÇÃO	EQUAÇÃO DE UTILIZAÇÃO	COEFICIENTE R ²	RESÍDUOS (S _x)	LIMITES DE ERRO
1 FURO - SIMÉTRICO	$x = ((y - 1,7078) / 0,995)$	0,9922	4,1682	$\pm 12,5046 \text{ m}^3/\text{h}$
1 FURO - ASSIMÉTRICO	$x = ((y + 1,0237) / 1,0355)$	0,9965	2,5161	$\pm 7,5482 \text{ m}^3/\text{h}$
7 FUROS - SIMÉTRICO	$x = ((y + 1,4342) / 1,024)$	0,9988	2,0700	$\pm 6,2101 \text{ m}^3/\text{h}$
7 FUROS - ASSIMÉTRICO	$x = ((y - 0,3472) / 1,0159)$	0,9968	3,2804	$\pm 9,8413 \text{ m}^3/\text{h}$

Na tabela 12 acima, os coeficientes de correlação linear de Pearson (R²) dispostos em ordem crescente são: (4º) 0,9922 - (3º) 0,9965 - (2º) 0,9968 - (1º) 0,9988, resíduos médios quadráticos (4º) 4,1682 - (3º) 3,2804 - (2º) 2,5161 - (1º) 2,0700 e os limites de erro (m³/h) em ordem decrescente são: (4º) $\pm 12,5046$ - (3º) $\pm 9,8413$ - (2º) $\pm 7,5482$ - (1º) $\pm 6,2101$.

Desta forma fica estabelecida que a melhor equação de utilização do instrumento investigado é $x = ((y + 1,4342) / 1,024)$, relativa a haste com 7 furos e quando instalada em TAP com perfil de velocidade axialmente simétrico.

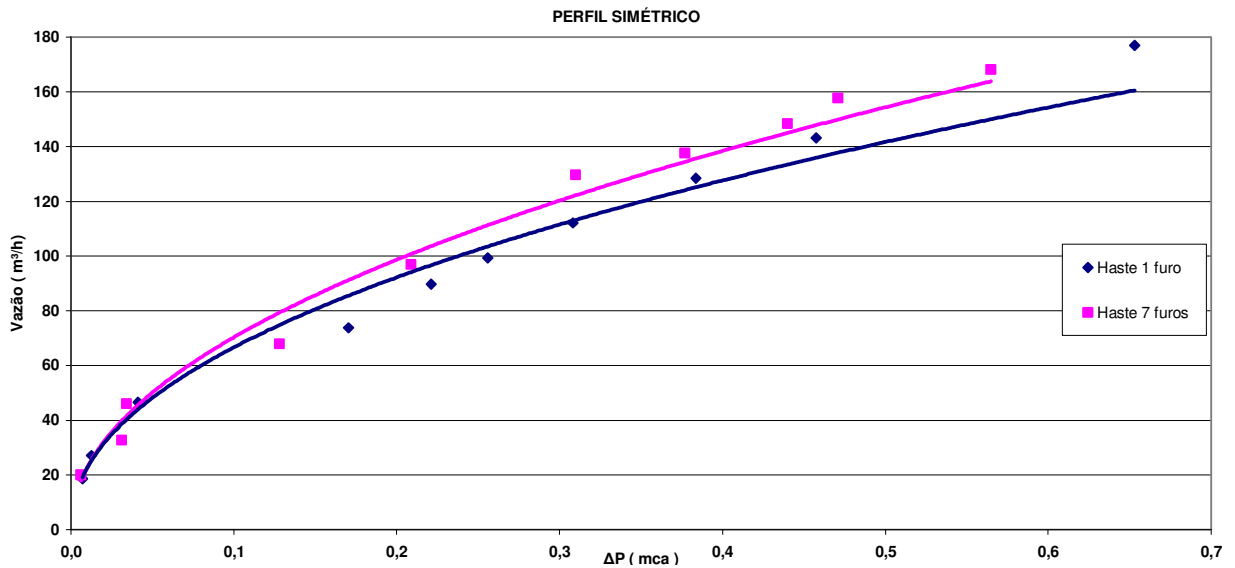


Figura 54 – Curvas experimentais obtidas no perfil simétrico com os dois medidores, de 1 furo e 7 furos.

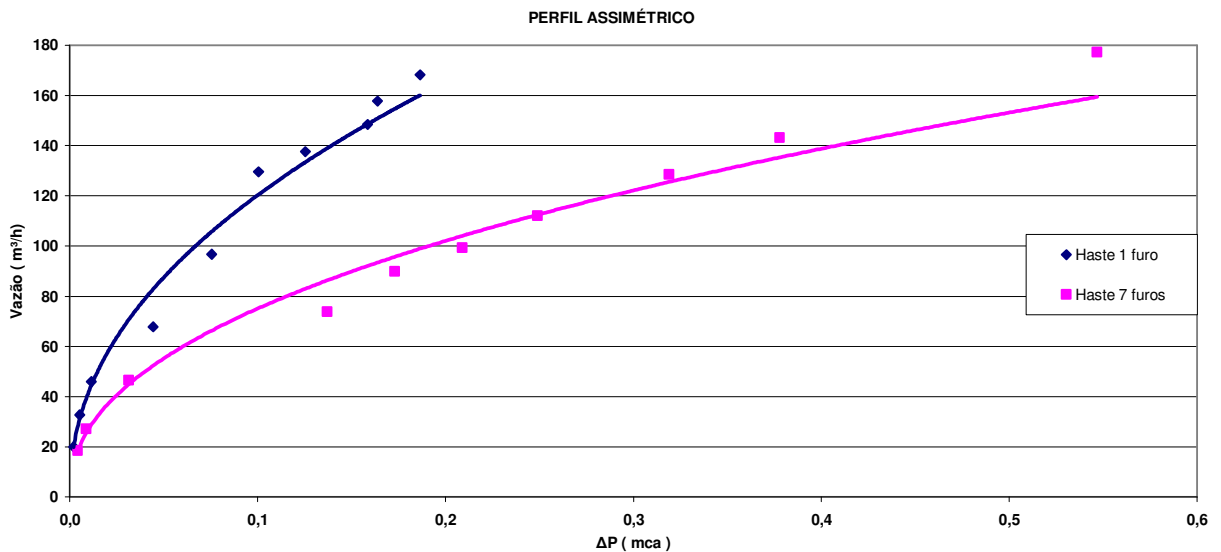


Figura 55 – Curvas experimentais obtidas no perfil assimétrico com os dois medidores, de 1 furo e 7 furos.

No perfil simétrico como mostra a figura 54, a curva do medidor de um furo se distancia consideravelmente da curva do medidor de 7 furos, a partir da deflexão de 0,15mca, intervalo que cobre a maioria das leituras obtidas, levando-nos a não validar a haste de um furo como boa opção neste caso. Na figura 55, podemos notar este fenômeno que se apresenta mais acentuado.

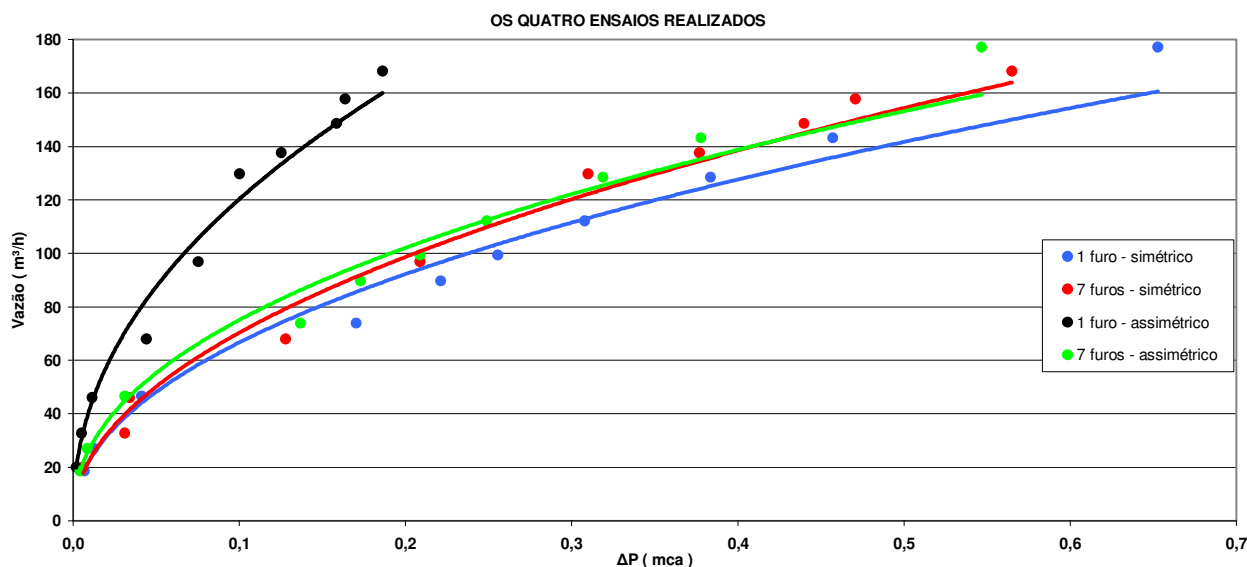


Figura 56 – Curvas experimentais obtidas nas duas seções ensaiadas com as duas hastes, 1 furo e 7 furos.

As curvas mostradas na figura 56 acima, representam o lugar geométrico no gráfico “vazão \times ΔP ” das coordenadas das quatro instalações ensaiadas.

No caso da haste de 1 furo, percebe-se que existe uma divergência muito grande entre as curvas quando instalada no perfil simétrico e assimétrico, indicando que poderá ocorrer desvios acentuados de leituras quando calibrado em ponto com condições hidráulicas favoráveis e utilizado em outro ponto.

Isto não ocorre com a haste de 7 furos, conforme figura 54, onde podemos perceber que as curvas desta haste se aproximam entre si, mesmo quando instaladas em situações totalmente adversas.

Desta forma, concluí-se que a haste construída com 7 tomadas de pressão é a melhor opção, pois se mostrou mais eficiente quando calibrado em um ponto com condições hidráulicas favoráveis e utilizado em outro bem diferente.

8. CONCLUSÃO

A aplicabilidade do medidor investigado associado à tecnologia simples com que foi adotada na sua concepção, torna-se viável a criação e manutenção desses medidores pelos próprios usuários.

A análise ao longo do trabalho, mostrou ser o medidor investigado, com haste de 7 (sete) furos, um instrumento com bom desempenho operacional, baixa perda de pressão no fluido escoado e que possui condições que satisfazem às demandas dos sistemas públicos de abastecimento de água tratada.

A comparação entre os dois medidores utilizados: Haste de 1 (um) furo e haste de 7 (sete) furos, permitiu a avaliação metrológica de grande importância para aplicação e estudos de medidores cujo princípio de funcionamento é o diferencial de pressão, visto ter constatado no desenvolver deste trabalho, a boa confiabilidade apresentada pelo medidor com haste de 7 (furos), mesmo quando instalado em locais com condições hidráulicas desfavoráveis.

O trabalho foi desenvolvido em uma importante rede de distribuição de água de Presidente Prudente-SP, denominado de Alto Eta, que se encontrava em plena operação durante todos os ensaios, este foi um aspecto importante, visto não ter sido utilizado nenhum protótipo, nem situações hipotéticas; mas sim aplicação em escala real.

Pode-se observar também neste trabalho que se procurou desenvolver, embora de forma sucinta, um modelo matemático que explicasse a influência das deformações do perfil de velocidades sobre as leituras, o que possibilitou também demonstrar que não ocorre ponto de estagnação em qualquer dos dois orifícios considerados no desenvolvimento da modelagem.

Esta fase do trabalho procura também incentivar os futuros pesquisadores da área a buscar explicações mais detalhadas do escoamento hidráulico no

interior das hastes de múltiplas tomadas de pressão, proporcionando uma melhor caracterização destes medidores.

Os modelos de hastes investigadas neste trabalho permitiram afirmar que, mesmo com o medidor equipado com haste de 1 (um) furo tendo respondido de certa forma aceitável à certas configurações de perfis de velocidade, ficou claro que quando houver necessidade, por algum motivo, seja por falta de espaço físico ou por exigência da instalação, de se efetuar calibrações em locais com condições hidráulicas favoráveis e aplicá-los em outros pontos de condições adversas, deve-se utilizar o medidor com haste de 7 (sete) furos.

Este trabalho pode ajudar em futuras pesquisas na determinação de alguns conceitos sobre os medidores deprimogênios, relacionando-os com o Número de Reynolds, Tipos de escoamentos, e Perfis de velocidades.

Em futuras pesquisas de seleção de medidores, instalações adequadas e procedimentos de calibração de macromedidores, o trabalho servirá para alavancar alguns aspectos de avaliações de custo, dificuldades de medição de vazão, e locais de instalação.

Algumas sugestões são propostas abaixo com relação ao escoamento no interior das hastes:

- Fazer um estudo hidráulico detalhado, com base na avaliação preliminar (estudo preliminar) descrito neste trabalho;
- Estudar as tomadas de pressão de montante e de jusante, buscando identificar como ficam distribuídas as linhas de fluxo junto às camadas limites na região das várias tomadas de pressão;
- Discutir com relação à porção de fluido escoado no interior das hastes, qual o real sentido de escoamento nas proximidades dos orifícios, bem;
- como determinar as diversas perdas de carga, resistentes ao escoamento interno, vislumbrando determinar a equação que rege a pressão equivalente resultante das tomadas de pressão da sonda, e que é coletada na parte superior das hastes.

9.REFERÊNCIAS

AMBROSIUS, E. E.; FELLOWS, R. D. ; BRICKMAN, A. D. **Mechanical measurement and instrumentation**. 4.ed. Pennsylvania: The Ronald Press Company, 1966.

AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Water treatment plant design**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1990.

BARBIERI, R. T. S. **Estudo numérico de geradores de vórtices para uso de medidores de vazão**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista/FEIS/DEM, 2006. (Relatório de estágio, R2846).

BENEDICT, R. P. **Fundamentals of temperature, pressure, and flow measurements**. 2.ed. Canada: John Wiley & Sons, 1976.

BENTLEY, J. P. **Measurement systems**. 3.ed. Londres: Licensing Agency, 1995.

BOLTON, W. **Instrumentation and measurement pocket book**. 3.ed. Manchester: Division of Reed Educational and Professional Publishing, 1996.

CARVALHO, D. F. **Instalações elevatórias e bombas**. Belo Horizonte: Gráfica da Universidade Católica de Minas Gerais. v.1

COMPANHIA DE SANEMANETO BÁSICO DO ESTDO DE SÃO PAULO – SABESP. **Pitometria**: aplicada a pesquisa de vazamentos. São Paulo: Sabesp, [1984]. 110p.

CONAUT – **Medidores de vazão.**

Disponível em: <http://www.ecr-sc.com.br/catalogo/magnet.pdf>> Acesso em: 02 de junho de 2007.

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão.** 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

DENÍCULI, W. **Medidores de vazão tipo orifício.** Viçosa: UFV, 1990. 43p.

DOEBELIN, E. O. **Measurement systems application and design.** 4.ed. California: McGraw-Hill, 1990.

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: 23 ago. 2007.

GONÇALVES, H. C. **Determinação experimental da frequência de emissão de vórtices de corpos rombudos.** 2001. 177 f (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2001.

INCONTROL – **Medidores de vazão.**

Disponível em: http://www.incontrol.ind.br/produtos_detalhe.php?produto=70> Acesso em: 16 de outubro de 2006.

KURZ,J. **Effect of internal flow circulation on self-averaging pitot tube arrays.** Monterey, CA:Kurz Instruments, Inc., 1996.

LIVELLI,G. **Fundamentals of Multi-Port Averaging Pitot Tubes in Natural Gas Measurement.** Texas: Dieterich Standard, Inc., 1997.

LUNUS – Medidores de vazão.

Disponível em: http://www.lunus.com.br/fluxo_de_agua.htm> Acesso em: 25 de abril de 2006.

MARSH-MCBIRNEY – Medidores de vazão.

Disponível em: http://www.marsh-mcbirney.com/Articles/clinton_util.htm> Acesso em: 11 de junho de 2007.

MARTINS, G. A. ; FONSECA, J S. **Curso de estatística**. 6.ed. São Paulo: Atlas, 1996.

MORRIS, A. S. **Principles of measurement and instrumentation**. 2.ed. Great Britain: Redwood Books, 1993.

MUROLO, A.C.; GONÇALVES, V. ; SILVA, E.M. **Estatística**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 1996. v.1.

NICOLAU, V.P.,GUTHS, S. **Medição de vazão** 05 novembro 2005.

Disponível em: <http://www.labtermo.ufsc.br/Vazão2.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2007.

QUINTELA, A. C. **Hidráulica**. 2.ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulben Kian, 1985.

REDDY-BUFFALOES PUMP COMPANY – Medidores de vazão.

Disponível em:<http://www.rbpump.com/UL-FMAPPROVALS/FLOWMETERS1.htm> > Acesso em: 15 de agosto de 2007.

ROSEMOUNT – Medidores de vazão – Product Data Sheet 00813-0100-4809, Rev EA.Catalog 2006 – 2007.

Disponível em: [http:// www.rosemount.com](http://www.rosemount.com) > Acesso em: 02 de março de 2007.

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).

TECHMETER - **Medidores de vazão**

Disponível em: http://www.oval.com.br/mvl_tm.htm> Acesso em: 20 de março de 2007.

UPP,E.L. **Fluid flow measurement: a practical guide to accurate flow measurement**. Houston: Gulf Publishing, 1993. 178p.

VIEIRA, R. C. C. **Atlas de mecânica dos fluidos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1971. v.3.

VIM – **Vocabulário Internacional de Metrologia**

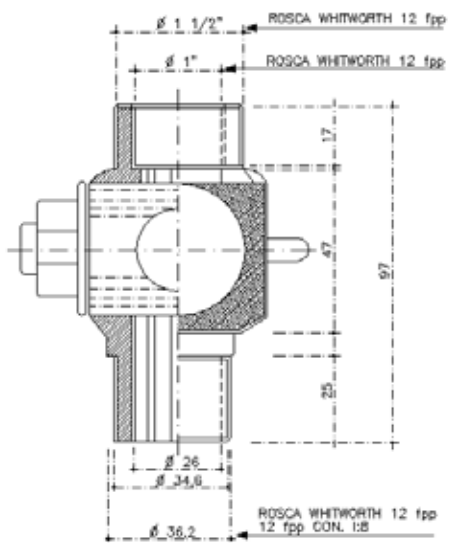
Disponível em: <http://www.normalizacao.cni.org.br/glossário.htm>> Acesso em: 10 de fevereiro de 2006.

YANG, W. J. **Handbook of flow visualization**. Michigan: Hemisphere Publishing Corporation, 1989.

ANEXOS

A N E X O 1

TAP



Detalhe e foto do *Tap* ou registro de derivação de 26 mm

ANEXO2

FOTOS



Uma vista do barrilete de recalque de uma das bombas do sistema Alto ETA



Estas bombas operam variando velocidades, por meio de conversores de frequência e sensores de pressão



Um protótipo do medidor investigado com diâmetro de 400mm que está sendo montado para utilização em exposições



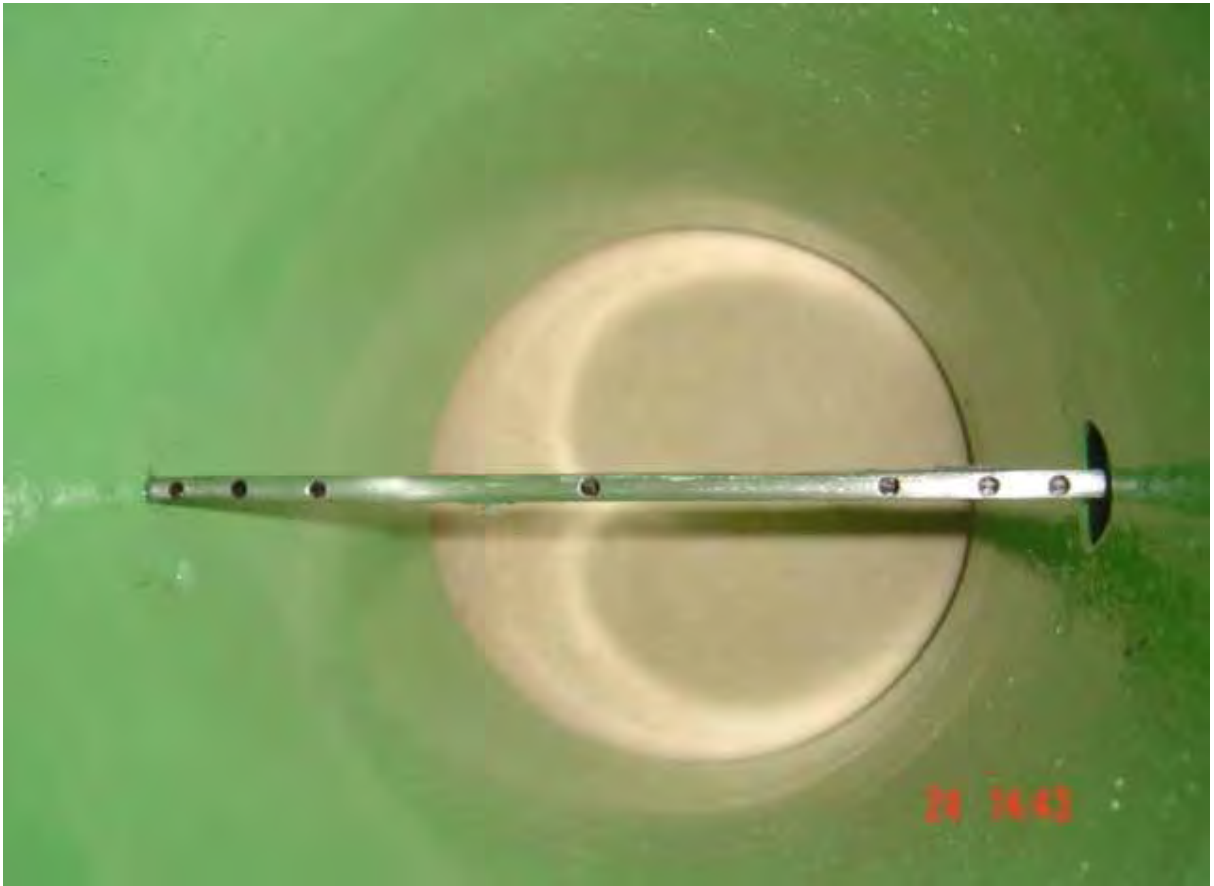
Equipamento construído para testar a pressão de trabalho admissível do medidor.



TAP onde foi introduzida a haste do medidor para testes de pressão máxima admissível.



Outro protótipo com diâmetro de 200mm que está sendo construído para exposição.



Uma vista do elemento primário (haste) no interior da tubulação.



Uma vista geral do dispositivo para calibração do transdutor de pressão diferencial.



Detalhes do dispositivo criado para calibragem do transdutor de pressão diferencial



Sistema Alto ETA onde foram instalados todos os *TAP*,s tanto para perfil de velocidade assimétrico como simétrico.



A foto mostra o TAP_1 que foi utilizado para perfil de velocidades assimétrico.



Realização de testes com hastes de 7 furos e com haste de 1 furo.



A aquisição dos dados foi feita eletronicamente em planilha do Excel.



O Notebook registra todos os dados adquiridos via cabo de sinal e interface dedicada.



Uma amostra das duas hastes que foram avaliadas neste trabalho.



Preparando os equipamentos para a substituição de hastes.



Alguns técnicos auxiliando nos trabalhos de Pitometria.



O técnico de Pitometria realiza operações com o Tubo Pitot Cole.



O Técnico de Pitometria monitora a aquisição dos dados.

ANEXO 3

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PADRÃO DE REFERÊNCIA

Laboratório de Medições Ambientais/ CMF

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 61 059-101

Cliente: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP
 Rua Costa Carvalho, 300
 05429-000 – São Paulo - SP

Material: Tubo de Pitot Cole

1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL

Tipo	: Pitot Tipo Cole
Fabricante	: Mecaltec
Modelo	: PL-300
Número de patrimônio	: não consta
Número de série	: não consta
Número de identificação	: ETA EC10 HJJ
Faixas de operação	: não consta

2 PADRÕES UTILIZADOS

Tubo de Pitot do tipo estático AP-01 em conjunto com micromanômetro PC-10. Certificados de calibração dos micrômetros números 35358 e 35359 de 04.07.2000, rastreados à RBC. Recalibração a cada 3 anos.

Manômetro de coluna de líquido PC-07. Certificado de calibração número 60 650-101 de 03.12.2004 rastreado à RBC. Recalibração a cada 3 anos.

Manômetro de coluna de líquido PC-06. Certificado de calibração número 49 082 de 03.06.2003, rastreado à RBC. Recalibração a cada 3 anos.

Sensores de temperatura TR-84 e TR-92, tipo PT-100. Certificados de calibração, números 55 412 e 55 411, respectivamente, de 12.04.2004, rastreados à RBC. Sensores acoplados ao indicador de temperatura TI-33. Recalibração a cada 3 anos.

Sensor de temperatura TR-100, tipo PT-100. Certificado de calibração número 51 136 de 06.10.2003 rastreado à RBC. Sensores acoplados ao indicador de temperatura TI-05, modelo DAH, número de série 10786. Recalibração a cada 3 anos.

Medidor de pressão barométrica PA-06. Certificado de calibração, número DIMCI 0330/2002 de 28.03.2002, rastreado a padrão do INMETRO. Recalibração a cada 5 anos.

3 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

CMF-LMA-PC-18 – *Procedimento para calibração de Tubo de Pitot tipo Cole com ar* - versão 01, revisão 02 - agosto de 2003.

Atenção: Este é um arquivo digital para consulta. O original deste Certificado, impresso em papel com a marca d'água IPT e devidamente assinado, é o único documento referente ao assunto aqui abordado que possui validade legal.

4 RESULTADOS

Os resultados dos coeficientes de calibração **C**, referentes aos lados A e B do tubo de Pitot Cole, em função do número de Reynolds (**Re**) dividido pelo comprimento característico **L**, são apresentados na Tabela 1, e também os valores da velocidade equivalente em água a 20°C $V_{\text{água}20^{\circ}\text{C}}$.

Tabela 1 - Resultados da calibração.

Lado A			Lado B		
Re/L (m ⁻¹)	$V_{\text{água}20^{\circ}\text{C}}$ (m.s ⁻¹)	C (-)	Re/L (m ⁻¹)	$V_{\text{água}20^{\circ}\text{C}}$ (m.s ⁻¹)	C (-)
$0,36 \times 10^6$	0,36	0,893	$0,35 \times 10^6$	0,35	0,875
$0,58 \times 10^6$	0,58	0,885	$0,58 \times 10^6$	0,58	0,875
$0,86 \times 10^6$	0,86	0,878	$0,86 \times 10^6$	0,86	0,875
$1,14 \times 10^6$	1,14	0,875	$1,14 \times 10^6$	1,15	0,874
$1,32 \times 10^6$	1,32	0,874	$1,32 \times 10^6$	1,33	0,873
$1,43 \times 10^6$	1,43	0,873	$1,43 \times 10^6$	1,44	0,872
$1,54 \times 10^6$	1,55	0,872	$1,55 \times 10^6$	1,56	0,872
$1,71 \times 10^6$	1,72	0,872	$1,72 \times 10^6$	1,72	0,870
$1,83 \times 10^6$	1,83	0,871	$1,84 \times 10^6$	1,84	0,870
$2,00 \times 10^6$	2,01	0,870	$2,00 \times 10^6$	2,01	0,869

As calibrações são realizadas em ar. A velocidade equivalente em água é apresentada para auxiliar o uso e interpretação dos resultados apresentados na Tabela 1. A equação utilizada para obter a velocidade equivalente em água, assim como as grandezas físicas, são mostradas no Anexo A, juntamente com um esquema do tubo de Pitot Cole.

O coeficiente de calibração **C** médio é

$$\begin{array}{l} \text{Lado A: } C = 0,873 \pm 0,009 \quad p/ \quad 0,86 \times 10^6 \leq \text{Re/L} \leq 2,00 \times 10^6 \\ \text{Lado B: } C = 0,872 \pm 0,009 \quad p/ \quad 0,86 \times 10^6 \leq \text{Re/L} \leq 2,00 \times 10^6 \end{array}$$

Incerteza

As incertezas expandidas relatadas são baseadas em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k=1,96$, fornecendo um nível de confiança de 95%.

5 ANEXO A

Informações Gerais.

Data da execução da calibração: 16 e 17.12.2004

São Paulo, 22 de dezembro de 2004.

CENTRO DE METROLOGIA DE FLUIDOS
Laboratório de Medições Ambientais

CENTRO DE METROLOGIA DE FLUIDOS
Laboratório de Medições Ambientais

Tec. Monica Cardoso
Executora da Calibração
R.E. n° 15 322

Fis. Gilder Nader
Responsável pelo Laboratório
R.E. n° 8465

Atenção: Este é um arquivo digital para consulta. O original deste Certificado, impresso em papel com a marca d'água IPT e devidamente assinado, é o único documento referente ao assunto aqui abordado que possui validade legal.

ANEXO A - INFORMAÇÕES GERAIS

A calibração do tubo de Pitot Cole é realizada para determinação do coeficiente de calibração C e calculada a partir da Eq.(A1):

$$C = \frac{V_{\text{padrão}}}{V_{\text{teste}}} \quad \text{Eq.(A1)}$$

A velocidade do fluido V é determinada a partir de:

$$V = C \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad \text{Eq.(A2)}$$

onde:

$V_{\text{padrão}}$: velocidade do ar obtida em laboratório com o tubo de Pitot padrão (em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

V_{teste} : velocidade do ar obtida em laboratório com o tubo de Pitot Cole (em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

ΔP : diferencial de pressão gerado pelo fluido no tubo de Pitot Cole (em Pa);

ρ : massa específica do fluido em escoamento (em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Os valores da velocidade equivalente em água indicados na Tabela 1 foram obtidos a partir da equação A3, e valem para água pura à temperatura de 20°C .

$$V_{\text{água}20^\circ\text{C}} = \frac{\mu_{20^\circ\text{C}} \cdot Re}{\rho_{20^\circ\text{C}} \cdot L} \quad \text{Eq.(A3)}$$

onde:

$\mu_{20^\circ\text{C}} = 1,0019 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

: viscosidade dinâmica da água pura à temperatura de 20°C .

$\rho_{20^\circ\text{C}} = 998,202 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

: massa específica da água pura à temperatura de 20°C .

A definição dos lados A e B do tubo de Pitot Cole está em acordo com esquema indicado na Figura A1, na qual, o parafuso de fixação é a referência.

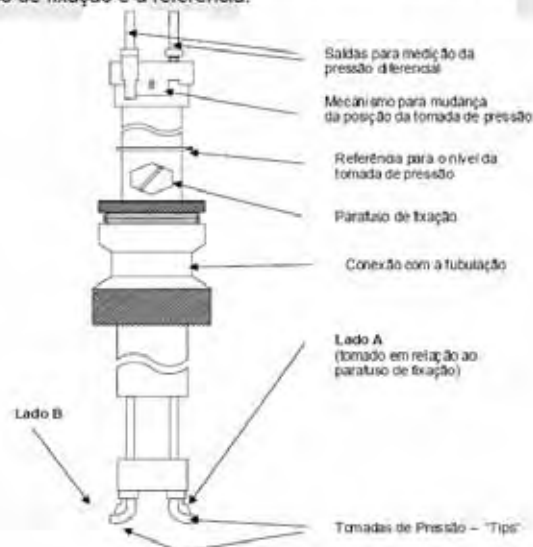


Figura A1. Tubo de Pitot Cole.

Atenção: Este é um arquivo digital para consulta. O original deste Certificado, impresso em papel com a marca d'água IPT e devidamente assinado, é o único documento referente ao assunto aqui abordado que possui validade legal.

ANEXO 4

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE
PRESSÃO DIFERENCIAL “A” Nº 230670-06**

INFORMAÇÕES GERAIS

Equip. nº Série:	U230670	O.S.:	2006/08906
Sensor nº Série:	U366615	TAG:	
Cliente:	SABESP		
Modelo:	LD301D-11I-BU11-012/A1/I1/P0		
Faixa de Entrada:	0.0 a 500.0 mmH ₂ O@20°C		
Faixa de Saída:	4 a 20 mA	Função de Saída:	Linear
Placa Principal:	51622	Versão Software:	6.06

DESCRIÇÃO

TRANSMISSOR PRESSÃO DIFERENCIAL COM CONTROLE PID INCORPORADO - HART/4-20 MA

[1] FAIXA	1.25 A 50 MBAR
[1] MATERIAL DO(S) DIAFRAGMA(S) E FLUIDO DE ENCHIMENTO	ACO INOX 316 L - OLIO SILICONE
[1] MATERIAL DO(S) FLANGES, ADAPTADOR(ES) E PURGA(S)	CF 8M / AÇO INOX 316
[8] MATERIAL DO(S) ANEL(IS) DE VEDACAO DA CELULA	BUNA N
[U] POSICAO DA PURGA	SUPERIOR
[1] INDICADOR LOCAL	COM INDICADOR DIGITAL
[1] CONEXAO AO PROCESSO	1/2 - 14 NPT (COM ADAPTADOR)
[0] CONEXAO ELETRICA	1/2 - 14 NPT
[1] AJUSTE DE ZERO E SPAN	COM AJUSTE LOCAL
[2] SUPORTE DE FIXACAO	PLANO, EM ACO INOX 316. ACESSORIOS: AI316

OPÇÕES

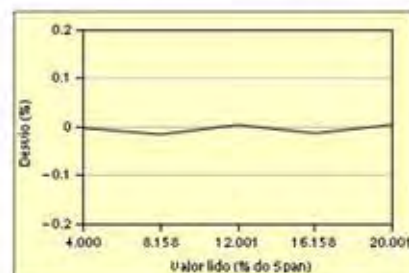
[A1] MATERIAL DOS PARAPUSOS E PORCAS DA FLANGE/ADAPT.	EM ACO INOX 316
[I1] PLAQUETA DE IDENTIFICACAO	PM: XP, IS, MI, DI, IP
[P0] PINTURA	CINZA MUNSSELL N 6,5


INFORMAÇÃO DA CALIBRAÇÃO

Data de calibração: 28/AGO/2006 Temp: 26 °C

PADRÃO DE TRABALHO			PADRÃO PRIMÁRIO		
Código	Descrição	Validade	Código	Descrição	Certificado
024-0180	TRANSMISSOR DE PRESSÃO - LD301 D11	MÊS 01/2007	024-0194	PISTÃO CILINDRICO - MODELO: 5203 - 50 PSI	0433/2000
			024-0198	JOGO DE MASSAS - 80 KG/CM2 - MODELO: 5203	13237/13238
030-0024	MULTIMETRO DIGITAL - HP34401A	MÊS 09/2006	030-0001	MULTIMETRO DIGITAL MODELO HP 34401A	67057-101

Valor de Referência (mmH ₂ O@20°C)	Valor lido (mmH ₂ O@20°C)	Valor de Referência (mA)	Valor lido (mA)	Erro (% do Span)
0.00000	-0.00625	4.0000	3.9998	-0.0013
130.00000	129.92501	8.1600	8.1576	-0.0150
250.00000	250.02500	12.0000	12.0000	0.0000
380.00000	379.93753	16.1600	16.1580	-0.0125
500.00000	500.02813	20.0000	20.0009	0.0096


 por
 William Cesar Mendes



ANEXO 5

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE
PRESSÃO DIFERENCIAL “B” Nº 230675-06**

INFORMAÇÕES GERAIS

Equip. nº Série:	U230675	O.S.:	2006/08906
Sensor nº Série:	U368553	TAG:	
Cliente:	SABESP		
Modelo:	LD301D-21I-BU11-012/A1/I1/P0		
Faixa de Entrada:	0.0 a 5000.0 mmH ₂ O@20°C		
Faixa de Saída:	4 a 20 mA	Função de Saída:	Linear
Placa Principal:	51635	Versão Software:	6.06

DESCRIÇÃO

TRANSMISSOR PRESSÃO DIFERENCIAL COM CONTROLE PID INCORPORADO - HART/4-20 MA

[2] FAIXA	4,16 A 500 MBAR
[1] MATERIAL DO(S) DIAFRAGMA(S) E FLUIDO DE ENCHIMENTO	ACO INOX 316 L - OLHO SILICONE
[1] MATERIAL DO(S) FLANGES, ADAPTADOR(ES) E PURGA(S)	CF 8M / AÇO INOX 316
[B] MATERIAL DO(S) ANEL(IS) DE VEDAÇÃO DA CELULA	BUNA N
[U] POSICAO DA PURGA	SUPERIOR
[1] INDICADOR LOCAL	COM INDICADOR DIGITAL
[1] CONEXAO AO PROCESSO	1/2 - 14 NPT (COM ADAPTADOR)
[0] CONEXAO ELETRICA	1/2 - 14 NPT
[1] AJUSTE DE ZERO E SPAN	COM AJUSTE LOCAL
[2] SUPORTE DE FIXACAO	PLANO, EM ACO INOX 316, ACESSORIOS: AI316

OPÇÕES

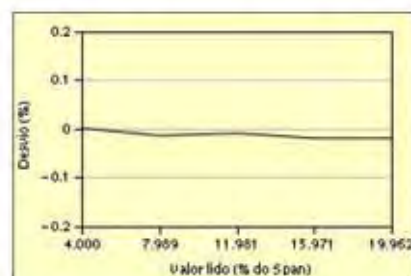
[A1] MATERIAL DOS PARAFUSOS E PORCAS DA FLANGE/ADAPT.	EM ACO INOX 316
[I1] PLAQUETA DE IDENTIFICACAO	FM: XP, IS, NI, DI, IP
[P0] PINTURA	CINZA MUNSSELL N 6,5

INFORMAÇÃO DA CALIBRAÇÃO

Data de calibração: 28/AGO/2006 Temp: 24 °C

PADRÃO DE TRABALHO			PADRÃO PRIMÁRIO		
Código	Descrição	Validade	Código	Descrição	Certificado
030-0024	MULTIMETRO DIGITAL - HP34401A	MÊS 09/2006	030-0001	MULTIMETRO DIGITAL MODELO HP 34401A	67057-101
024-0008	BALANÇA PESO MORTO - RK 40000cm	MÊS 08/2006	024-0194	PISTÃO CILINDRICO MODELO 5203 - 50 PSI	0433/2000
			024-0198	JOGO DE MASSAS 80 Kg/Cm2 - MODELO 5203	13237-13238

Valor de Referência (mmH ₂ O@20°C)	Valor lido (mmH ₂ O@20°C)	Valor de Referência (mA)	Valor lido (mA)	Erro (% do Span)
0.00000	0.15665	4.0000	4.0005	0.0031
1250.00000	1249.37639	7.9913	7.9899	-0.0125
2500.00000	2499.62969	11.9826	11.9814	-0.0075
3750.00000	3749.10016	15.9739	15.9710	-0.0181
5000.00000	4999.10287	19.9652	19.9623	-0.0181


 por
 William Cesar Mendes



ANEXO 6

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE
PRESSÃO DIFERENCIAL “C” Nº 230673-06**

INFORMAÇÕES GERAIS

Equip. nº Série:	U230673	O.S.:	2006/08906
Sensor nº Série:	U363366	TAG:	
Cliente:	SABESP		
Modelo:	LD301D-11I-BU11-012/A1/I1/P0		
Faixa de Entrada:	0.0 a 500.0 mmH ₂ O@20°C		
Faixa de Saída:	4 a 20 mA	Função de Saída:	Linear
Placa Principal:	51534	Versão Software:	6.06

DESCRIÇÃO

TRANSMISSOR PRESSAO DIFERENCIAL COM CONTROLE PID INCORPORADO - HART/4-20 MA

[1] FAIXA	1.25 A 50 MBAR
[1] MATERIAL DO(S) DIAFRAGMA(S) E FLUIDO DE ENCHIMENTO	ACO INOX 316 L - OLIO SILICONE
[1] MATERIAL DO(S) FLANGES, ADAPTADOR(ES) E PURGA(S)	CP 8M / AÇO INOX 316
[B] MATERIAL DO(S) ANEL(ES) DE VEDACAO DA CELULA	BUNA N
[U] POSICAO DA PURGA	SUPERIOR
[1] INDICADOR LOCAL	COM INDICADOR DIGITAL
[1] CONEXAO AO PROCESSO	1/2 - 14 NPT (COM ADAPTADOR)
[0] CONEXAO ELETRICA	1/2 - 14 NPT
[1] AJUSTE DE ZERO E SPAN	COM AJUSTE LOCAL
[2] SUPORTE DE FIXACAO	PLANO, EM ACO INOX 316. ACESSORIOS: AI316

OPÇÕES

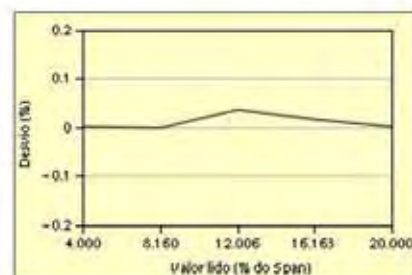
[A1] MATERIAL DOS PARAFUSOS E PORCAS DA FLANGE/ADAPT.	EM ACO INOX 316
[I1] PLAQUETA DE IDENTIFICACAO	FM: XP, IS, NI, DI, IP
[P0] PINTURA	CINZA MUNSSELL N 6,5

INFORMAÇÃO DA CALIBRAÇÃO

Data de calibração: 26/AGO/2006 Temp: 26 °C

PADRÃO DE TRABALHO			PADRÃO PRIMÁRIO		
Código	Descrição	Validade	Código	Descrição	Certificado
024-0180	TRANSMISSOR DE PRESSÃO - LD301 D11	MÊS 01/2007	024-0194	PISTÃO CILINDRICO - MODELO: 5203 - 50 PSI	0433/2000
			024-0198	JOGO DE MASSAS - 80 KG/CM ² - MODELO: 5203	13237/13238
030-0024	MULTIMETRO DIGITAL - HP34401A	MÊS 09/2006	030-0001	MULTIMETRO DIGITAL MODELO HP 34401A	67057-101

Valor de Referência (mmH ₂ O@20°C)	Valor lido (mmH ₂ O@20°C)	Valor de Referência (mA)	Valor lido (mA)	Erro (% do Span)
0.00000	0.01563	4.0000	4.0085	0.0031
130.00000	130.00312	8.1600	8.1601	0.0006
250.00000	250.19062	12.0000	12.0061	0.0381
380.00000	380.09065	16.1600	16.1629	0.0181
500.00000	500.01562	20.0000	20.0085	0.0031


 por:
 William Cesar Mendes



ANEXO 7

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE
PRESSÃO DIFERENCIAL “D” Nº 196267-04**

smar**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO**

Instrumento Série No.: U196267 Sensor No.: U311260 O.S.: 2004/12212

Cliente: SABESP

Modelo: LD301D-11I-BU11-012/A1/I1/P0

TAG:

Calibração: 0 a 50 mbar

DESCRIÇÃO

LD301D TRANSMISSOR INTELIGENTE PRESSAO DIFERENCIAL COM CONTROLE PID INCORPORADO

[1] FAIXA 1.25 A 50 MBAR

[1] MATERIAL DO(S) DIAFRAGMA(S) E FLUIDO DE ENCHIMENTO AÇO INOX 316 L - OLEO SILICONE

[1] MATERIAL DO(S) FLANGES, ADAPTADOR(ES) E PURGA(S) CF 5M / AÇO INOX 316

[1] MATERIAL DO(S) ANEL(IS) DE VEDACAO DA CELULA BUNA N

[1] POSICAO DA PURGA SUPERIOR

[1] INDICADOR LOCAL COM INDICADOR DIGITAL

[1] CONEXAO AO PROCESSO 1/2 - 14 NPT (COM ADAPTADOR)

[1] CONEXAO ELTRICA 1/2 - 14 NPT

[1] AJUSTE DE ZERO E SPAN COM AJUSTE LOCAL

[2] SUPORTE DE FIXACAO PLANO, EM AÇO INOX 316, ACESSORIOS:

OPÇÕES

[A1] MATERIAL DOS PARAFUSOS E PORCAS DA FLANGE/ADAPT. EM AÇO INOX 316

[I1] PLAQUETA DE IDENTIFICACAO EM: KP, IS, NI, DI, IP

[P0] PINTURA CINZA MUNSELL N 6,5

CARACTERÍSTICAS GERAIS

Data calibração: 08/DEZ/2004

Versão de software: 6.04

Placa principal Série No.: 46107100007820

Observações:

PADRÃO TRABALHO			PADRÃO PRIMARIO		
Código	Descritivo	Validade	Código	Descritivo	Certificado
030-0026	MULTIMETRO DIGITAL - HP34401A	MEZ 01/2005	030-0031	MULTIMETRO DIGITAL MODELO HP 34401A	48054
024-0181	TRANSMISSOR DE PRESSÃO - LD301 D11	MEZ 02/2005	024-0084	FISTÃO CILINDRICO MODELO 8103 - 50 PSI	0433/2000
			024-0085	JOGO DE BASTAS 50 Kg/Cm2 - MODELO 8207	13237-13238

CALIBRAÇÃO

Pressão de Entrada (mbar)	Saída Ideal (mA)	Pressão Atual (mbar)	Saída Atual (mA)
0.0000	4.000	0.000	4.000
12.7250	8.072	12.731	8.076
25.4500	12.144	25.471	12.154
37.1969	15.903	37.211	15.909
49.9250	19.976	49.927	19.977


Calibrado por: Cledson Cangem

Data de emissão: 07/DEZ/2006

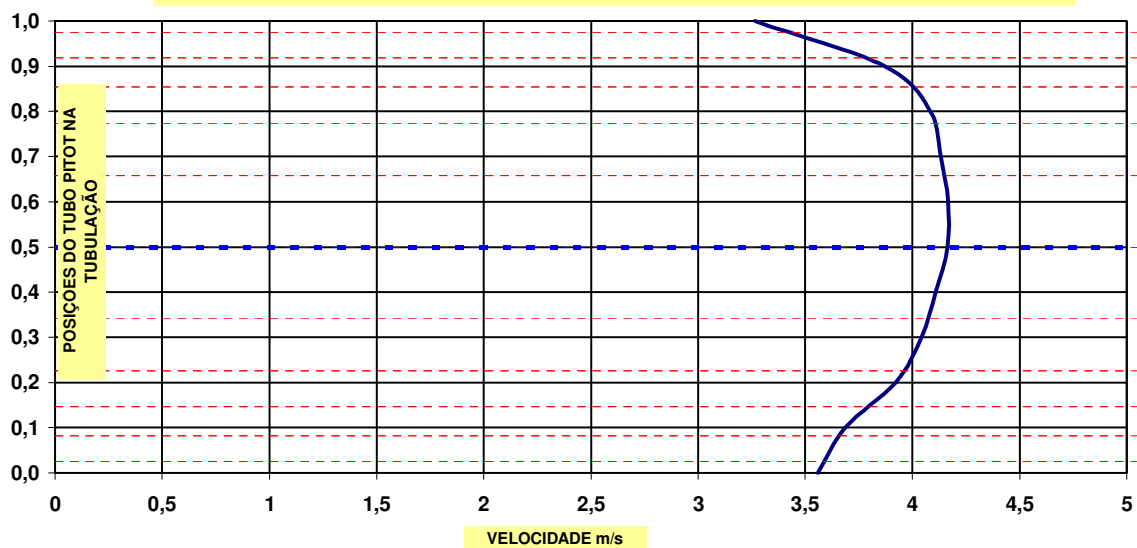


ANEXO 8

**MODELO DE MAPEAMENTO DE PERFIL DE VELOCIDADE,
NESTE CASO TRATA-SE DO TAP3 – SIMÉTRICO, DESTINADO
AO MONITORAMENTO COM O PADRÃO DE REFERÊNCIA.**

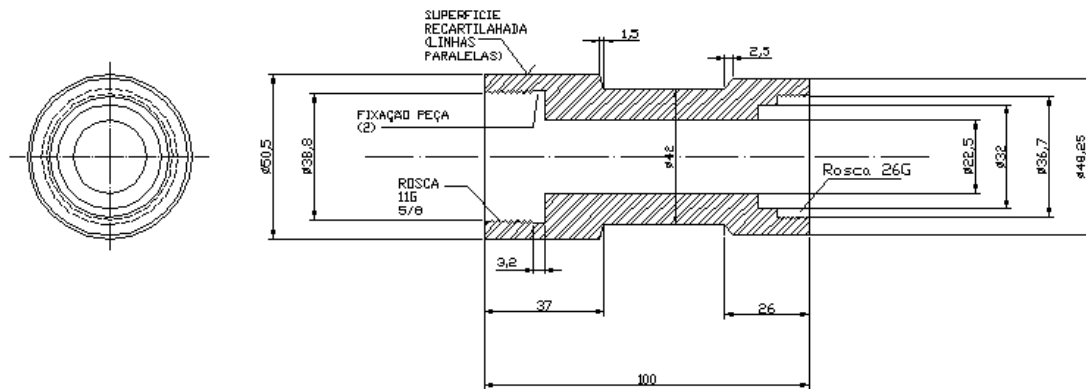
Trabalho	Avaliação de medidores com múltiplas tomadas de pressão na macromedição em sistemas de água											
Comunidade	Presidente Prudente	Sistema	Abastecimento alto ETA	Data	12.06.06							
Equipamento Utilizado como padrão de referência	Pitot nº ETAEC10HJJ											
Certificado de Calibração - Rastreabilidade	61 059 - 101 IPT 22.12.04											
Tubulação	Material	Ferro fundido dúctil NBR 7663 e ISO 2531 Classe K7 resv.com cimento Øext:170mm										
	Diâmetro (mm)	nominal	150									
		real	150	proj.TAP (mm)	2							
Parede	Espessura de ferro: 5,2mm		espessura de cimento: 2,5mm									
Posição do Pitot (mm)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	134	
ΔP (mm H ₂ O) - Descendo	545	773	845	868	890	881	867	827	783	693	643	
ΔP (mm H ₂ O) - Subindo	543	756	855	872	880	887	855	838	785	694	649	
MÉDIA ΔP (mm H ₂ O) Descendo Subindo	 <p>UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" Campus de Ilha Solteira</p> <p>MAPEAMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADE NO INTERIOR DA TUBULAÇÃO UTILIZANDO TUBO PITOT COLE NO TAP₃ - AXIALMENTE SIMÉTRICO</p>										POSIÇÃO DO PITOT (% Diâmetro)	Velocidade √2.g.h (m/s)
544											0,0	3,560129211
764,5											0,1	3,688694891
850											0,2	3,92199949
870											0,3	4,041491061
885											0,4	4,11008759
884											0,5	4,164622432
861											0,6	4,166977322
832,5											0,7	4,13151304
784											0,8	4,083748278
693,5	0,9	3,872917505										
646	1,0	3,266998623										

MAPEAMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO NA TUBULAÇÃO NO TAP3 - SIMÉTRICO
TAP PARA MONITORAMENTO COM TUBO PITOT COLE

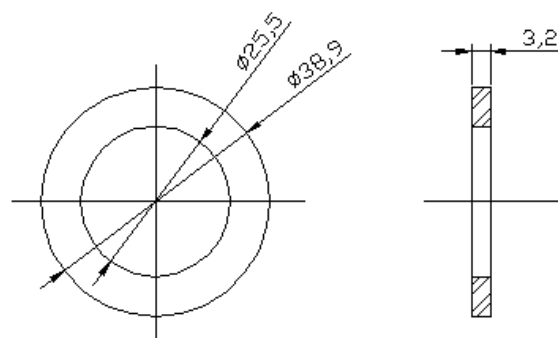


ANEXO 9
DETALHES CONSTRUTIVOS DA SONDA

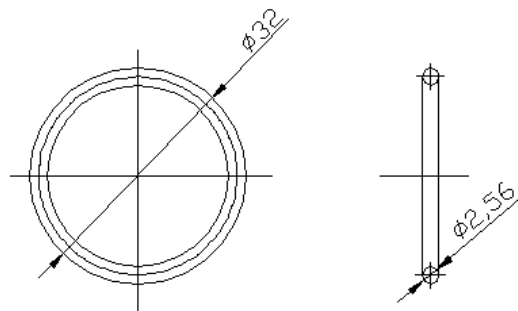
Medidor de Vazão em Condutos Forçados - Base de bronze SAE 40 (1)



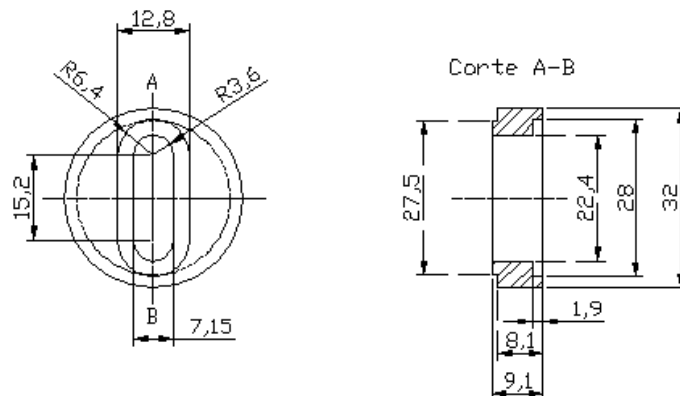
Medidor de Vazão em Condutos Forçados - Borracha Lona Simples TAP (2)



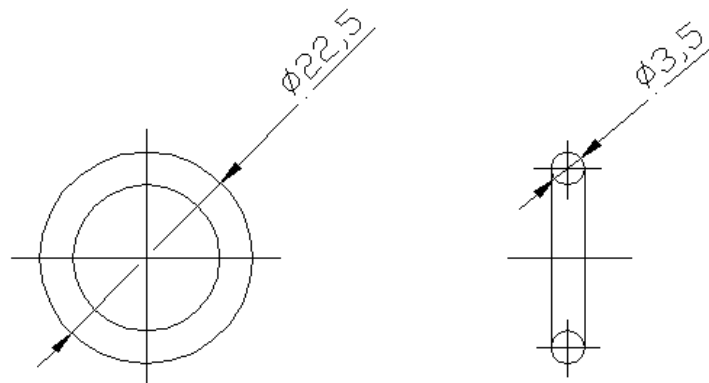
Medidor de Vazão em Condutos Forçados - O-ring borracha Bruna N (3)



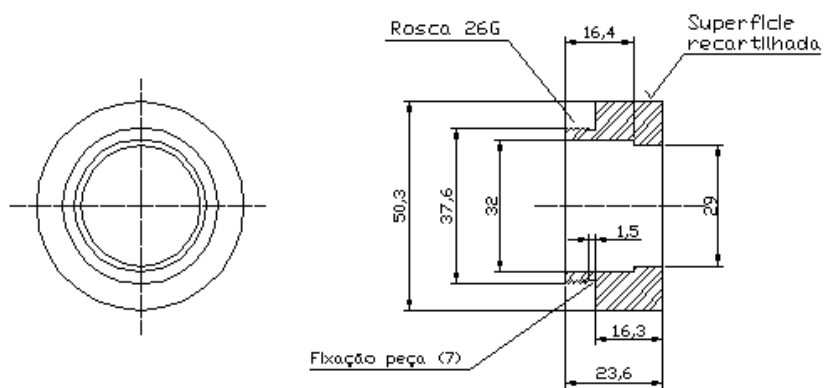
Medidor de Vazão em Condutos Forçados - Prato intermediário Bronze SAE 40 (4)



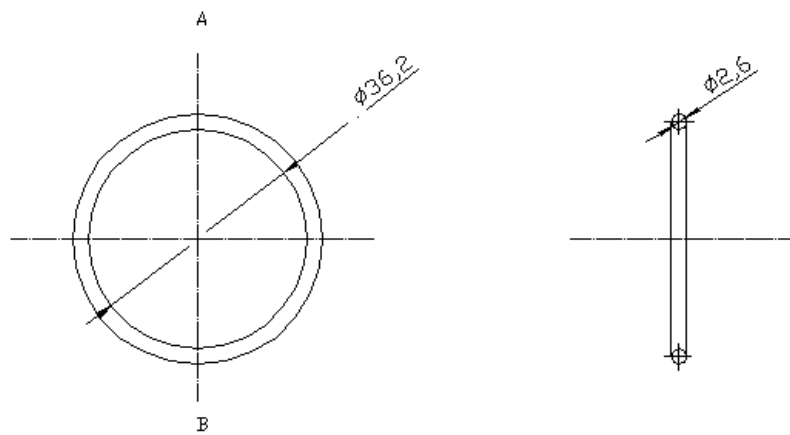
Medidor de Vazão em Condutores Forçados - O'ring de Borracha Bruna N (5)



Medidor de Vazão em Condutores Forçados - Porca vazada recartilhada em Bronze SAE 40 (6)

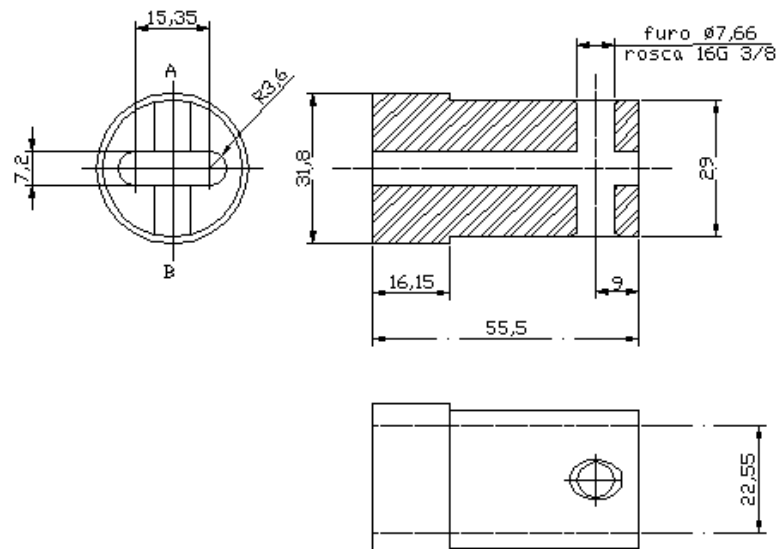


Medidor de Vazão em Condutos Forçados - O-ring de Borracha Bruna N na base da Porca Recartilhada (7)

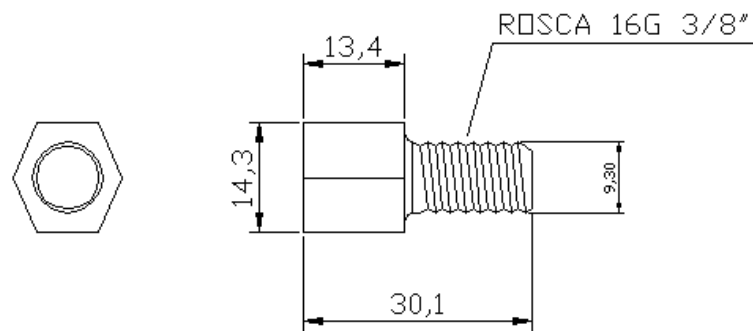


Medidor de Vazão em Condutos Forçados - Mancal Gula deslizante para haste em Bronze SAE 40 (8)

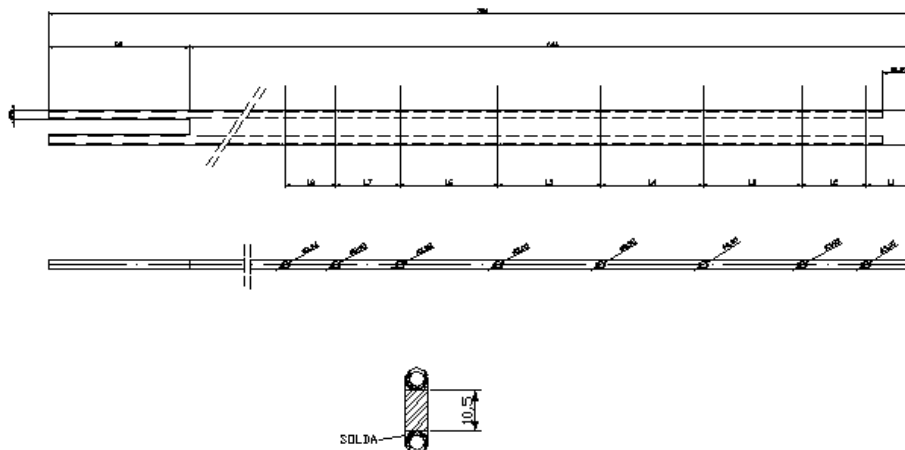
Corte A-B



Medidor de Vazão em Condutos Forçados - Parafuso em Bronze SAE 40 sextavado (09)



Medidor de Vazão em Condutos Forçados - Haste Multifunras em aço Inoxidável 316 (10)



ANEXO 10
PLANTA DA ETA
(LOCAL DOS TESTES)

