NATALLY ANNUNCIATO SIQUEIRA

**Medidor de vazão de água, tipo "Pitot-Cole", com configuração
prismática hexagonal**

**São Paulo
2018**

NATALLY ANNUNCIATO SIQUEIRA

**Medidor de vazão de água, tipo "Pitot-Cole", com configuração
prismática hexagonal**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção do
título de Mestre em Ciências.

São Paulo
2018

NATALLY ANNUNCIATO SIQUEIRA

Medidor de vazão de água, tipo "Pitot-Cole", com configuração prismática hexagonal

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Hidráulica e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza

São Paulo

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de agosto de 2018

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Siqueira, Natally Annunciato.

Medidor de vazão de água, tipo "Pitot Cole", com configuração prismática hexagonal / N. Siqueira -- versão corr. -- São Paulo, 2018.

76 p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1. Medidor de Vazão 2. Tubo de Pitot 3. Pressão Diferencial I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II. t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me acompanharam durante o desenvolvimento deste trabalho, ele só foi possível devido ao apoio recebido.

Ao professor Dr. Podalyro Amaral de Souza pela brilhante orientação, motivação e todo aprendizado.

Aos professores do programa de pós graduação de engenharia civil da Escola Politécnica e à professora Dra. Yvone de Faria Lemos De Lucca pelos ensinamentos.

À minha mãe, Suely Mercedes Annunciato, e ao meu esposo, Leonardo Henriques Mello, pelo constante suporte e incentivo que contribuíram de forma significativa para que eu conseguisse concluir a dissertação.

Ao Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos - CTH pela disposição do espaço para realização dos ensaios experimentais.

Ao meu pai, Valter Miguel Siqueira Jr., ao meu tio Ricardo Siqueira, e aos funcionários do CTH: Amauri Jorge da Silva, José Amaro da Silva, Luiz Carlos Ribeiro, Roberto Antônio Fernandes e Roberto de Oliveira Bezerra sempre dispostos a auxiliar na construção e instalação dos protótipos elaborados.

Ao Antônio Costa Carvalho e ao Luis Antônio da Cunha Rinaldi pelo auxílio e presteza nos ensaios elaborados.

À Sabesp e meus amigos sabespianos pelas amizades, apoio e aprendizado, e aos gerentes Alessandro Muniz Paixão e Anderson Vicente Catarino pela compreensão que viabilizaram a realização desta dissertação.

À todos que contribuíram de alguma forma.

RESUMO

SIQUEIRA, N. A. Medidor de vazão de água, tipo "Pitot-Cole" com configuração prismática hexagonal. São Paulo. 2018. 74 p. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

A medição de vazão é fundamental para a gestão de processos que envolvem fluidos. Em empresas de saneamento, contabilizar as entradas e saídas de água é essencial para gerir faturamentos e perdas. A vazão pode ser mensurada através de diversos instrumentos com diferentes princípios de aplicação. O Tubo Pitot Cole é capaz de determinar a vazão em tubulações através do diferencial de pressão. Trata-se de um equipamento inventado em 1732 por Henri Pitot para determinar a velocidade, e aperfeiçoado por Eduard Cole, em 1896, permitindo sua aplicação em tubulações. As principais vantagens são o baixo custo e fácil instalação, que pode ocorrer com a tubulação em carga. Em contrapartida, a fragilidade e complexidade das suas peças motivaram este trabalho: a elaboração de um instrumento simples e robusto para medir a vazão. Propõe-se a construção de um protótipo com tomadas de pressão instaladas em faces opostas de um prisma hexagonal e avalia-se a sua viabilidade na medição de vazão. Os resultados mostraram-se promissores dada a estabilidade e forte correlação linear obtida no coeficiente de calibração.

Palavras-Chave: Medidor de Vazão; Tubo de Pitot; Medidor de Velocidade.

ABSTRACT

SIQUEIRA, N. A. Water flow meter, as "Pitot-Cole", with hexagonal prismatic configuration . São Paulo. 2018. 74 p. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Flow measurements are essential for processes management that include fluids. In water companies, measuring inlets and outlets of water is essential to manage revenue and water losses. The water flow can be measured through different instruments with different application principles. The Pitot Cole Tube is able to determine flow in pipes through the pressure differential. This device was invented in 1732 by Henri Pitot to determine fluid velocity and it was improved by Eduard Cole in 1896, allowing to apply the instrument in pipes. The main advantages are the low cost and easy installation, that may occur with the pipe under load. However, the fragility and complexity of its pieces motivated this study: the construction of a simple and robust instrument to measure the water flow. It is proposed the construction of a prototype with pressure plugs installed on opposite faces of a hexagonal prism, then evaluation of its effectiveness in water flow measurements. The results were promising given the stability obtained in the calibration coefficient.

Keywords: Flow meter; Pitot Tube; Velocity meter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pontos de controle de água em um sistema de abastecimento	13
Figura 2 - Calibração do lado A e lado B de TIPs de dois tubos Pitot Cole	15
Figura 3 – Classificação geral de medidores de vazão de fluidos	17
Figura 4 – Esquema de funcionamento do medidor eletromagnético.....	18
Figura 5 – Medidores de turbina	18
Figura 6 – Medidor ultrassônico de tempo de trânsito	19
Figura 7 - Tubo de Venturi.....	20
Figura 8 – Esquema de instalação de uma placa de orifício.....	20
Figura 9 - Medidor Annubar	21
Figura 10 - Tubo de Pitot modificado por Darcy	26
Figura 11 - Detalhamento das tomadas de pressão do Tubo Pitot Cole	27
Figura 12 - Seis formas de Tubo de Pitot testadas por John Airey.....	27
Figura 13 - TAP de uma polegada.....	28
Figura 14 - Esquemático do Tubo Pitot Cole	28
Figura 15 - Tubo Pitot Cole - acessórios e componentes	29
Figura 16 - Perfil de velocidades	30
Figura 17 - Vazão elementar de cada anel.....	32
Figura 18 - Perfil de velocidades obtido com o Tubo Pitot Cole	32
Figura 19 - Corpos delgados e rombudos.....	36
Figura 20 – Esquemático do protótipo e protótipo utilizado	38
Figura 21 - Tomada de pressão do protótipo e do tubo Pitot Cole	39
Figura 22 – Esquema da bancada de ensaio	40
Figura 23 - Bancada de ensaio.....	41
Figura 24- Ensaio de calibração	41
Figura 25 - Primeira etapa da confecção do protótipo	42
Figura 26 - Protótipo elaborado para a medição de vazão, flanges de PVC ..	42
Figura 27 - Preparo para instalação do protótipo na tubulação.	43
Figura 28 - Bancada de ensaio com o protótipo instalado.....	44
Figura 29 - Esquema da sonda do Pitot Clássico	45
Figura 30 - Esquema das tomadas de pressão do protótipo	46
Figura 31 - Determinação do coeficiente de velocidade	53
Figura 32 - Coeficiente de velocidade em função do número de Reynolds....	54

Figura 33 - Determinação do coeficiente de calibração.....	60
Figura 34 - Comparativo entre a vazão do vertedor e do protótipo.....	61
Figura 35 - Esquemático frontal.....	75
Figura 36 - Esquemático lateral (esquerda) e corte AA (direita).....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos principais medidores de vazão ...	22
Tabela 2 - Desempenho entre os principais medidores de vazão	24
Tabela 3 - Ajuste devido à projeção do TAP.....	33
Tabela 4 - Ajuste de correção da área.....	34
Tabela 5 - Medições realizadas no ensaio de calibração	52
Tabela 6 - Medições no vertedor realizadas no ensaio de calibração	55
Tabela 7 - Determinação de "a"	55
Tabela 8 - Medições no vertedor realizadas no ensaio de calibração	57
Tabela 9 - Medições realizadas no ensaio de calibração	58

NOTAÇÕES, GRANDEZAS E UNIDADES

Notação	Grandeza	Unidade
a	Adimensional de diferencial de pressão	-
A	Área na seção transversal do tubo	m^2
A_a	Coeficiente de ajuste de área	-
A_p	Área projetada do protótipo	m^2
C_d	Coeficiente de correção do diâmetro	-
C_p	Coeficiente de ajuste do protótipo	-
C_q	Coeficiente de vazão	-
C_t	Coeficiente de projeção do TAP	-
C_v	Coeficiente de velocidade	-
d	Diâmetro circunscrito ao prisma do protótipo	m
D	Diâmetro do tubo	m
e	Base neperiana	-
F_v	Fator de velocidade	-
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
H	Altura piezométrica	m
h_1, h_2	Leitura piezométrica 1, 2	mH_2O
H_v	Lâmina de água no vertedor triangular	m
K	Constante de aferição do vertedor	-
k	Constante de ajuste do equipamento	-
k_v	Constante de von-Kármán	-

L	Comprimento do tubo	m
L_e	Distância entre eletrodos	m
L_v	Leitura da ponta limnimétrica	m
M	Parâmetro de entropia	-
n	Número de anéis	-
p	Pressão	mH ₂ O
p_1, p_2	Pressão na tomada 1, 2	mH ₂ O
P	Peso	kgf
Q	Vazão	m ³ /s
Q_v	Vazão do vertedor	m ³ /s
R	Raio do tubo	m
r	Distância radial	m
Re	Número de Reynolds	-
$Re_{máx}$	Número de Reynolds para velocidade máxima	-
t	Tensão	Pa
v	Velocidade	m/s
v_1, v_2	Velocidade na tomada 1, 2	m/s
V	volume	m ³
v_i	Velocidade no anel de índice i	m/s
z_1, z_2	Cota na tomada de pressão 1, 2	m
Δh	Diferencial de pressão	mH ₂ O
$\Delta h_0, \Delta h_1$	Diferencial de pressão na tomada central e periférica	mH ₂ O

$\bar{u}$	Velocidade média	m/s
$u_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima	m/s
u^*	Velocidade de cisalhamento	m/s
ν	Viscosidade cinemática	m ² /s
ρ	Massa específica	kg/m ³
θ	Ângulo do quadro	°

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Considerações Iniciais	12
1.2. Objetivos	14
1.3. Justificativas	14
2. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Medidor de vazão	16
2.1.1. Principais macromedidores em sistemas de abastecimento de água	17
2.1.2. Tubo Pitot Multifuros.....	21
2.1.3. Seleção do tipo de medidor de vazão	22
2.2. Tubo Pitot	24
2.2.1. A origem do Tubo Pitot	24
2.2.2. Tubo de Pitot Cole.....	28
2.3. Corpos rombudos e a camada limite	35
2.4. Entropia máxima e o perfil de velocidades	36
3. ESTUDO EXPERIMENTAL.....	38
3.1. Ensaio preliminar - canal aberto	38
3.1.1. O protótipo.....	38
3.1.2. Ensaio de Calibração	39
3.2. Ensaio - conduto forçado.....	42
3.2.1. O protótipo.....	42
3.2.2. Aferição do protótipo	43
4. TRATAMENTO ANALÍTICO	45
4.1. O modelo conceitual para determinação da velocidade	45
4.1.1. Hipóteses.....	45
4.1.2. Tubo Pitot	45

4.1.3.	Aplicação do Modelo Matemático ao Protótipo Ensaiado.....	46
4.1.4.	Análise da consistência	48
4.2.	Determinação do parâmetro de entropia	48
4.3.	Determinação da velocidade pela medição na tomada central.....	50
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1.	Viabilidade do formato hexagonal.....	52
5.2.	Viabilidade do protótipo para a medição de vazão - sem calibração	54
5.3.	Viabilidade do protótipo para a medição de vazão - com calibração	56
5.3.1.	Algoritmo para a obtenção da vazão	60
5.3.2.	Cálculo das incertezas	61
6.	CONCLUSÕES	65
7.	RECOMENDAÇÕES	67
8.	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICE A - Posição das tomadas de pressão periféricas.....	72
	APÊNDICE B - "a" em função do parâmetro de entropia (M)	74
	APÊNDICE C - Esquemático do protótipo.....	75

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A água é imprescindível para a manutenção da vida! Em 8 de janeiro de 1977, foi estabelecida a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), lei nº 9.433, que visa, em um de seus objetivos "assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos".

Dentre os principais usos da água, apontam-se o consumo humano, a dessedentação de animais, a irrigação, a navegação, a geração de energia e o uso industrial, sendo os dois primeiros os prioritários em situação de escassez, segundo a PNRH.

Devido à importância da água e ao aumento das demandas hídricas em áreas urbanas, faz-se necessária uma melhor gestão e eficiência do sistema público de água. Desde a captação da água bruta até a distribuição no imóvel do consumidor, ocorrem perdas; o processo de distribuição está relacionado aos maiores índices, estimando-se que, no Brasil, no ano de 2016, as perdas de água na distribuição alcancem o valor de 36,7%, e em países com sistemas mais eficientes, as perdas não alcançam 10% (SNIS, 2018).

A Figura 1 ilustra as principais entradas e saídas de água em um sistema de abastecimento de água típico, evidenciando que as medições de vazão são fundamentais para a gestão dos processos, de forma a subsidiar elementos que visam o diagnóstico operacional, mensurar faturamento, a gestão de perdas de água e o controle da eficiência, requerendo confiabilidade dos dados apresentados.

No mercado há vários dispositivos para a medição de vazão. A escolha do equipamento deve analisar a necessidade da aplicação, particularidades do escoamento e características do medidor como: incerteza, custos, tempo de vida, facilidade de instalação e viabilidade de realização da calibração.

Neste contexto, para a medição de vazão em condutos forçados, os medidores comumente utilizados são os eletromagnéticos, os de vórtice, os de velocidade, os ultrassônicos e os de pressão diferencial. Em função do seu local de aplicação, os medidores podem ser classificados como macromedidores ou micromedidores.

Figura 1 - Pontos de controle de água em um sistema de abastecimento

Fonte: ALEGRE *et al.* (2000).

Os macromedidores são medidores instalados em pontos entre a captação da água bruta até extremidades da rede de distribuição, e os micromedidores são medidores instalados em pontos de abastecimento de um determinado usuário.

Com o objetivo de avaliar quantitativamente o nível de medição nos sistemas de abastecimento de água, o indicador de macromedição apresenta a proporção do volume de água que foi disponibilizado para a distribuição e que foi medido. No

Brasil, o valor médio do indicador de macromedição é de 76,0%, no entanto há disparidade entre as regiões do país. O sudeste apresenta o indicador mais favorável, 87,3%, enquanto a região norte apresenta apenas 43,5%. Isto, por sua vez, indica a necessidade de melhoria na gestão de sistemas hídricos, já que a ausência de macromedidores inviabiliza a contabilização do volume de água utilizado no processo (SNIS, 2018).

CAMURI (2001) afirma que no Brasil, a macromedição dos sistemas de abastecimento de água é deficiente tanto em qualidade como em quantidade. Tal deficiência é consequência dos altos custos de aquisição dos macromedidores usuais, bem como da dificuldade de instalação e manutenção.

Frente à necessidade de aumentar o nível de medição em sistemas públicos de abastecimento, este trabalho apresenta revisão bibliográfica sobre macromedidores e propõe a aplicação de um medidor de vazão cujo princípio de funcionamento é semelhante ao Tubo Pitot Cole, entretanto, as tomadas de pressão estão instaladas em faces opostas de um prisma hexagonal o que deixa o equipamento simples e robusto.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo é avaliar a viabilidade do formato prismático hexagonal na realização de medições de vazão utilizando o princípio do diferencial de pressão.

Propõe-se a construção de um protótipo para medição de vazão com tomadas de pressões posicionadas em faces opostas de um prisma hexagonal, assim como determinar sua viabilidade e lei de aferição.

1.3. JUSTIFICATIVAS

O Tubo Pitot Cole é um medidor de velocidade que possui princípio de funcionamento baseado na determinação do diferencial de pressão entre duas tomadas opostas (TIPs), o que permite a determinação da velocidade do escoamento e consequentemente a vazão.

Como vantagens da aplicação, ressaltam-se o baixo custo, facilidade no transporte e manuseio, podendo ser inserido em tubulações, mesmo que em carga, através de um registro de derivação (TAP). No entanto, devido à extensão dos TIPs, com comprimento superior ao diâmetro do TAP, estes devem ser rotacionados no

momento da instalação, implicando possibilidade de quebra, deformação ou desalinhamento devido colisões das tomadas de pressão com a parede interna da tubulação e assim levar a erros de medição.

Ainda, relacionado aos TIPs, há dificuldade de execução do seu projeto. Estudos apontam grande discrepância nas medidas destes, constatando ser esta a principal causa significativa da diferença obtida entre os coeficientes de calibração (PEDRAZZI, 1992).

Devido à dificuldade na execução dos TIPs, para um único equipamento, pode existir diferença no coeficiente de calibração dependendo da posição do TIP, de qual face está apontada para o escoamento. A Figura 2 ilustra a calibração para o lado A e lado B de dois tubos Pitot Cole.

Fonte: Buscarini (2015).

Neste trabalho construiu-se um protótipo para a medição de vazão onde as tomadas de pressão estão posicionadas em faces opostas de um prisma hexagonal. Com essa modificação espera-se mitigar erros na medição, mantendo a simplicidade da aplicação do equipamento, tornando-o mais robusto, de simples construção e instalação, assim como ser uma alternativa de baixo custo com grande potencial para enfrentar a deficiência de macromedições nos sistemas de abastecimento públicos.

2. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo destina-se à apresentação da fundamentação teórica necessária para a formulação e compreensão do estudo, envolvendo os conceitos de medidor de vazão, e em especial sobre o Tubo Pitot.

2.1. MEDIDOR DE VAZÃO

Pode-se definir medidor de vazão como um instrumento que mede a razão do escoamento ou a quantidade de movimento de um fluido em um canal aberto ou fechado em um intervalo de tempo, sendo constituído usualmente por um elemento primário e um elemento secundário.

O elemento primário, assim denominado por estar em contato direto com o fluido, produz o sinal que relaciona o escoamento com uma lei da física. Por sua vez, o elemento secundário converte a resposta transmitida pelo elemento primário para leitura ou transmissão à distância do valor correspondente à vazão.

A norma técnica brasileira ABNT NBR 10.396 (1988) também apresenta sua definição: medidor de vazão de fluidos é um instrumento utilizado para medir a quantidade de fluido que escoar em um determinado elemento condutor, na unidade de tempo.

A classificação dos medidores de vazão pode apresentar diferentes formatos, mas a mais usual, e também utilizada por esta norma técnica, os agrupa em medidores volumétricos (ou mássicos) ou medidores de vazão instantânea, e posteriormente os separa pelo princípio de operação. A Figura 3 apresenta esquematicamente este formato de classificação.

Para medidores volumétricos a vazão é calculada através de instrumentos que possuem câmaras com capacidade de volume pré-definida, sendo o volume do fluido determinado pelo enchimento e esvaziamento destas câmaras. Como exemplos podem ser citados os medidores de diafragma, palheta, pistão, rotor e disco de natação.

Para os medidores de vazão instantânea, a vazão é obtida calculando o fluido que escoar continuamente através do elemento primário, fornecendo indicação instantânea proporcional à vazão. São exemplos os medidores eletromagnéticos, os de vórtice, os de velocidade, os ultrassônicos e os de pressão diferencial.

Figura 3 – Classificação geral de medidores de vazão de fluidos

Fonte: adaptado da NBR 10.396/1998.

2.1.1. Principais macromedidores em sistemas de abastecimento de água

Com o intuito de apresentar uma visão geral, são apresentados os instrumentos para a medição de vazão mais difundidos em sistemas públicos de abastecimento de água.

2.1.1.1. Medidor Eletromagnético

Apresenta componentes eletrônicos bastante desenvolvidos, cujo princípio é baseado na indução eletromagnética de Faraday. O movimento de um fluido condutor atravessando um campo magnético induz uma tensão na direção normal à do campo magnético e à direção média das partículas do fluido (FRANGIPANI; 2007a).

Pode-se obter a velocidade do escoamento através da seguinte equação:

$$v = \frac{t}{\rho \cdot L_e} \quad (2.1)$$

Onde:

v = velocidade;

t = tensão;

ρ = massa específica;

L_e = distância entre eletrodos.

Em geral, o medidor é composto por tubo de aço inoxidável, um par de bobinas que geram o campo eletromagnético e um par de eletrodos instalados em contato com o fluido.

Figura 4 – Esquema de funcionamento do medidor eletromagnético

Fonte: TAIRA (2003).

2.1.1.2. Medidor de Turbina

Neste tipo de medidor, o elemento primário percebe a vazão em termos da velocidade que é determinada em função da rotação de uma turbina ou hélice instalada na tubulação. Esta hélice pode ocupar toda a seção do tubo, medindo diretamente a vazão, ou parte da seção do tubo, através da medição de velocidades pontuais.

Figura 5 – Medidores de turbina

Fonte: INCONTROL (2017); NAUCO (2017).

2.1.1.3. Medidor Ultrassônico

Os medidores ultrassônicos são dotados de sensores que enviam e recebem ondas ultrassônicas, após terem se propagado através do fluido. Entre as muitas técnicas de medição por ultrassom, duas são as mais difundidas: o efeito Doppler e o tempo de trânsito.

O efeito Doppler se dá pela variação de frequência que ocorre quando as ondas de som são refletidas pelas partículas móveis do fluido, sendo mais adequados para medir vazão de fluidos que contenham partículas capazes de refletir ondas acústicas, como a água bruta. A velocidade do fluido é obtida mediante uma relação direta entre a frequência do som que é emitida, e a frequência do som que é captada.

O tempo de trânsito, por sua vez, baseia-se no intervalo de tempo que um feixe inclinado demora para percorrer o trecho entre o emissor e o receptor, relacionando-se à função da velocidade média do escoamento.

Figura 6 – Medidor ultrassônico de tempo de trânsito

Fonte: TAIRA (2003).

2.1.1.4. Tubo de Venturi

O Tubo de Venturi possui como princípio de aplicação o diferencial de pressão gerado pela restrição do escoamento da tubulação e consequente aumento da velocidade.

Figura 7 - Tubo de Venturi

Fonte: adaptado de DIGITROL (2017).

2.1.1.5. Placa de Orifício

O medidor também é baseado no princípio do diferencial de pressão gerado pela passagem do fluido através de um orifício feito em uma placa instalada na linha. O equipamento pode apresentar variações na posição do orifício: concêntrico, excêntrico ou segmental.

Figura 8 – Esquema de instalação de uma placa de orifício

Fonte: adaptado de DWYER (2017).

2.1.1.6. Tubo de Pitot

É um medidor que determina velocidades pontuais através do diferencial de pressão. Sendo este equipamento foco do estudo, será melhor detalhado na seção 2.2.

2.1.2. Tubo Pitot Multifuros

É uma variação do Tubo Pitot que utiliza várias tomadas de pressão, de 4 a 8 pontos, distribuídas em uma haste instalada ao longo da seção transversal do tubo, que permite determinar a velocidade média interna de uma tubulação sem a necessidade de levantar um perfil de velocidades.

Uma versão desses medidores muito conhecida é a comercializada sob marca "*Annubar*", Figura 9, patenteado pela Dietrich Standard Corporation em 1960. Neste medidor há dois tubos, um de pressão total e um de pressão estática.

O tubo de pressão total é composto por uma única sonda fixa com várias tomadas de pressão, alimentando uma câmara comum, proporcionando uma única pressão total. A instalação posiciona a sonda ao longo do diâmetro total da tubulação, de forma que as múltiplas tomadas de pressão meçam subáreas equivalentes da seção transversal.

O tubo que mede a pressão estática encontra-se posicionado atrás do tubo que mede a pressão total, com o orifício de tomada de pressão localizado ao centro da tubulação.

A raiz quadrada da diferença entre essas pressões total e estática pode ser relacionada por calibração com a vazão no tubo.

Figura 9 - Medidor Annubar

Fonte: SOLE (2011).

2.1.3. Seleção do tipo de medidor de vazão

Como visto, existem diversos dispositivos destinados à medição de vazão, a escolha do equipamento deve considerar análises dos seguintes fatores:

- Exigências e necessidades da medição, definir qual o objetivo da medição;
- Particularidades do escoamento;
- Características do medidor;
- Condições externas e internas ao tubo;
- Tipo de instalação;
- Manutenção; e
- Fatores econômicos.

De forma a subsidiar a escolha do equipamento, apresentam-se dois quadros comparativos para os principais macromedidores de vazão. O primeiro, Tabela 1, apresenta as vantagens e desvantagens.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos principais medidores de vazão

Medidores	Vantagens	Desvantagens
Eletromagnéticos	Alta precisão; Boa Resistência (não possui peças móveis); Não obstruem a passagem do fluido.	Requer instalação cuidadosa, principalmente no aterramento; Necessita de fonte de energia; Requer que o fluido apresente condutividade; Alto custo.
Turbina	Causa baixa perda de carga;	Necessário manutenção constante; Requer maiores cuidados na instalação e usinagem das pás.
Ultrassônico	Boa resistência (não possui peças móveis); Permite instalação em carga.	Custo Elevado; Tecnologia relativamente recente; Dependente de dados precisos como espessura da parede da tubulação e qualidade da água.

continua

continuação

Medidores	Vantagens	Desvantagens
Tubo de Venturi	Baixo custo de instalação; Alta precisão quando bem dimensionado.	Baixo intervalo de medição;
Placa de Orifício	Baixo custo de instalação; Requer pouca manutenção; Alta precisão quando bem dimensionado.	Insere grande perda de carga no escoamento; Baixo intervalo de medição;
Tubo de Pitot	Portátil; Custo relativamente baixo; Capaz de medir baixas vazões, incluindo tubos de pequenos diâmetros.	Baixa resistência (possui peças móveis);

O segundo, Tabela 2, apresenta o desempenho das seguintes propriedades: valores de exatidão, repetibilidade, intervalo de medição e diâmetros comerciais. Apresentam-se seus conceitos:

- **Discriminação:** refere-se à precisão de um instrumento, ou seja, o grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas.
- **Exatidão:** é um conceito qualitativo que associa o grau de concordância do valor medido em relação a um valor aceito como padrão. Representa a possibilidade de erro esperado na medição da grandeza.
- **Intervalo de medição:** indica a relação entre o valor máximo e mínimo possível de ser medido pelo equipamento com a mesma exatidão.
- **Repetitividade:** indica a capacidade de o medidor fornecer o mesmo resultado quando utilizado para medir medições consecutivas sob as mesmas condições.
- **Reprodutibilidade:** é o grau de concordância entre os resultados da medição de um mesmo mensurando, efetuadas sob condições variadas.

Tabela 2 - Desempenho entre os principais medidores de vazão

MEDIDOR	EXATIDÃO (%)	REPETIBILIDADE	INTERVALO DE MEDIÇÃO	DIÂMETROS
TUBO DE VENTURI	$\pm 0,75$	$\pm 0,25$	4:1 até 10:1	25mm - 3m
PLACA DE ORIFÍCIO	$\pm 0,25$ a $\pm 2,0$	$\pm 0,25$	4:1	Todos
ELETROMAGNÉTICO	$\pm 0,5$	$\pm 0,25$	10:01	2.5mm – 3m
TURBINA	$\pm 0,25$ a $\pm 2,0$	$\pm 0,25$	10:01	5 – 600mm
ULTRA-SÔNICO	$\pm 1,0$ a $\pm 2,5$	$\pm 0,25$	20:01	3.1mm – 3m
PITOT	$\pm 0,25$ a 5,0	$\pm 5,0$	4:1	(?)13mm – 2,4m

Fonte: AWWA (1989) *apud* MARTIM (2005).

2.2. TUBO PITOT

O Tubo Pitot foi o primeiro instrumento proposto para medir a velocidade de fluidos utilizando como princípio de operação o diferencial de pressão. O equipamento possui aplicação tanto na aeronáutica, para medir velocidade em aviões, como na hidráulica, para medir vazões.

2.2.1. A origem do Tubo Pitot

A invenção do Tubo Pitot passou por diversos processos de estudo e aperfeiçoamento. Apresenta-se, em seguida, o histórico de sua criação.

2.2.1.1. Henri Pitot (1695-1771)

Henri Pitot nasceu em Aramon, na França. Iniciou sua carreira como astrônomo e matemático ingressando na Academia Real de Ciências em Paris em 1724. Interessado pelo escoamento de água em rios e canais, utilizou o rio Sena como seu principal campo de pesquisa.

Na época, para a determinação da velocidade de um escoamento, o método empregado consistia em observar o intervalo de tempo gasto no deslocamento de um objeto flutuando na superfície da água, o que deixava o inventor insatisfeito.

Motivado em aperfeiçoar o método, em 12 de novembro de 1732, Pitot apresentou sua invenção: *Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux*. O trabalho apresentava um instrumento capaz de medir a velocidade de fluidos e também dados relevantes sobre a variação da

velocidade no escoamento da água em função da profundidade. Na época acreditava-se que a velocidade aumentava com a profundidade, no entanto, Pitot observou justamente o contrário.

O instrumento desenvolvido foi denominado de Tubo Pitot. Sua construção utilizava dois tubos de vidro posicionados verticalmente em uma moldura de madeira acoplada a uma escala métrica. O primeiro tubo, reto, era destinado a medir a pressão estática. O segundo tubo, confeccionado com uma curva de 90 graus, era posicionado na direção do escoamento, destinado a mensurar a pressão total.

Para realizar medições de velocidade, o instrumento devia ser inserido no fluido e anotada a diferença do nível entre os tubos, inferindo que o diferencial de pressão era proporcional ao quadrado da velocidade do fluido, apesar de não ter o apoio da equação de Bernoulli, publicada somente em 1738 por Daniel Bernoulli.

Ainda que o instrumento tenha sido inovador para época e fundamental para a dinâmica dos fluidos, existiam limitantes para a aplicação. Por não haver consenso sobre a teoria do Tubo Pitot, muitos tentaram reproduzir o experimento com tubos em formatos diversos, que produziam resultados incoerentes (ANDERSON JR., 2015).

2.2.1.2. Henri Philibert Gaspard Darcy (1803-1858)

Darcy, nascido em Dijon na França, formou-se em engenharia e foi responsável pela construção do sistema de distribuição de água em sua cidade natal. Interessado em pesquisas sobre hidráulica, em 1858, com o auxílio de Henri Bazin, publicou um artigo onde foram apresentadas modificações no Tubo Pitot.

O trabalho de Darcy apresentou melhorias que incluíram:

- Redução do diâmetro do tubo, reduzindo oscilações na coluna d'água;
- Permitiu realizar leituras fora d'água através da instalação de uma válvula que podia isolar a comunicação do equipamento com o escoamento;
- Permitiu que a pressão na parte superior dos tubos do manômetro diferísse da atmosférica através da ligação de ambos os tubos a uma válvula. O operador poderia inserir um pequeno vácuo em ambos os tubos, abrindo a válvula, sugando o bocal e, em seguida, fechando a válvula. O vácuo extrairia a água dos tubos para uma altura conveniente para a leitura, e como a pressão em ambos era igual, a diferença permaneceria a mesma.

- Reduziu a interferência do equipamento no escoamento substituindo a parte inferior dos tubos de vidro por tubos de cobre achatados.

Figura 10 - Tubo de Pitot modificado por Darcy

Fonte: TROSKOLANSKI (1960) *apud* MARTIM (2005).

2.2.1.3. Edward Smith Cole (1871-1950)

Edward Cole nasceu nos Estados Unidos em 1871. Obteve o título de doutor em aeronáutica em 1894, e em 1896, baseado nas melhorias realizadas por Darcy, apresentou novas modificações no Tubo Pitot - o tubo Pitot Cole, que permitiu a aplicação do equipamento em tubulações sob pressão, e instalação mesmo que em carga, sem a interrupção do seu funcionamento.

Em 1905, fundou a empresa *Pitometer Company* em Nova York. Trinta anos mais tarde, publicou um artigo onde descreve o método de mapeamento do perfil de velocidade e integração. Também enfatizou neste trabalho a necessidade de calibração do equipamento (TAIRA, 2003).

Mais de 100 anos se passaram dos desenvolvimentos realizados por Cole, e os mesmos ainda são amplamente utilizados nas empresas de saneamento, sendo mantidas as formas geométricas e metodologia de cálculo (TAIRA, 2003).

Figura 11 - Detalhamento das tomadas de pressão do Tubo Pitot Cole

Fonte: BEAN (1971) *apud* MARTIM (2005).

2.2.1.4. John Airey (1885- 1962)

A aplicação da equação e Bernoulli para o cálculo da velocidade utilizando tubos Pitot foi apresentada em 17 de abril 1913, quando o inglês John Airey, professor de engenharia mecânica da Universidade de Michigan, publicou o estudo *Notes on the Pitot Tube* na *Engineering News*, que abordou o comportamento de Tubos Pitot através de análises que avaliaram uma série de experimentos em ambientes controlados, testando seis sondas de Pitot com formatos diferentes.

Figura 12 - Seis formas de Tubo de Pitot testadas por John Airey

Fonte: Engineering News (1913), *apud* ANDERSON JR (2015).

2.2.2. Tubo de Pitot Cole

Dos diversos tipos de Tubo Pitot existentes, o tipo Cole é o mais utilizado pelas empresas de saneamento no Brasil devido ao baixo custo e à simplicidade de operação, que incluem a facilidade no transporte e no manuseio, podendo ser inserido em tubulações, mesmo que em carga através de registros de derivação (TAP), Figura 13. Devido às suas características, também é amplamente utilizado como referência para aferições e calibrações de diversos tipos de macromedidores.

FONTE: FRANGIPANI (2007b).

O instrumento é composto por uma haste com dois tubos metálicos em seu interior. Quando instalados, parte da haste é inserida dentro da tubulação e os tubos metálicos em seu interior comunicam o líquido com o ambiente externo à tubulação. Na extremidade inferior dos tubos metálicos existem duas tomadas de pressão, que na instalação ficam em posições opostas, uma contra o escoamento e a outra a favor, podendo-se medir a pressão diferencial entre elas, o qual será proporcional à velocidade do escoamento. Para medir o diferencial de pressão, podem-se utilizar manômetros. A Figura 14 ilustra esquemático o medidor e a Figura 15 ilustra esquemático com a descrição de seus componentes e acessórios.

FONTE: Adaptado de BUSCARINI (2015).

Figura 15 - Tubo Pitot Cole - acessórios e componentes

FONTE: FRANGIPANI (2007b).

2.2.2.1. Projeto de instalação

O projeto de uma instalação de medidores de vazão deve seguir uma sequência geral que deve considerar os seguintes aspectos:

- Escolha do local de instalação;
- Posicionamento frente às singularidades: deve haver comprimentos retos mínimos à montante e jusante ;
- Garantia do preenchimento completo da tubulação;
- Dimensionamento;
- Verificação do perfil de velocidades que deve ser completamente desenvolvido;
- Tipo de conexão do instrumento à tubulação;
- E projeto do abrigo.

Neste contexto, para a instalação do Tubo Pitot Cole, recomenda-se que, para maior exatidão, o diâmetro da tubulação seja superior a 100 mm devido à obstrução na tubulação provocada pelo equipamento; que a velocidade no local de instalação seja superior a 0,32 m/s, de forma a mitigar erros na leitura da deflexão; que a pressão dinâmica seja superior a 3,0 mca, para que a altura da haste do Tubo Pitot seja superada e seja transmitida ao manômetro; que seja evitada a instalação em pontos

altos, de forma que a seção do tubo esteja plena; e que se respeite trechos retos mínimos de 20 vezes o diâmetro, a montante, e 10 vezes o diâmetro, a jusante. Além destas condições, deve-se considerar a pressão máxima de trabalho, segundo a norma europeia E9551 é de 20kgf/cm² (FRANGIPANI; 2007b).

2.2.2.2. Perfil de velocidade

Todo fluido real possui viscosidade. Desta forma, considerando o princípio de adesão total, observa-se que no escoamento dentro de uma tubulação, o fluido em contato com suas paredes possui velocidade nula. No sentido das bordas ao centro da tubulação, as partículas vizinhas vão sendo atingidas pelo efeito de adesão total e vão sendo aceleradas até atingirem o eixo do tubo onde encontra-se a velocidade máxima, o que torna o perfil de velocidades variável.

O perfil de velocidades também varia em função do tipo de escoamento: em escoamentos laminares, o perfil possui formato semelhante a uma parábola, e a velocidade no centro da tubulação equivale ao dobro da velocidade média do escoamento; em escoamentos turbulentos o perfil é mais achatado e a velocidade no centro é cerca de 1,2 vezes a velocidade média, (Figura 16). Ainda, devido à presença de singularidades como curvas, reduções e válvulas na rede de água, o perfil pode ficar mais distorcido.

Figura 16 - Perfil de velocidades

Fonte: TAIRA (2003).

2.2.2.3. Equacionamento básico

Para a determinação da vazão em equipamentos que têm como princípio de funcionamento o diferencial de pressão, em geral, aplica-se a equação de Bernoulli.

Do desenvolvimento desta equação para tubos Pitot Cole obtém-se que:

$$v = k \sqrt{\frac{2 \Delta h}{\rho}} \quad (2.1)$$

Onde:

k = coeficiente de ajuste do equipamento;

v = velocidade;

Δh = diferencial de pressão;

ρ = massa específica da água a 22°C.

Ou seja, dado o coeficiente de ajuste do equipamento, que varia entre 0,84 e 0,89 (TAIRA, 2003) , o diferencial de pressão e a massa específica do fluido, obtém-se a velocidade.

Para determinação da vazão, aplica-se a equação da continuidade que estabelece que em um escoamento em regime permanente, a vazão em massa de um fluido é a mesma em qualquer uma das seções transversais da tubulação. Dessa forma, pode-se aplicar a equação (2.3):

$$Q_i = v_i \cdot A_i \quad (2.2)$$

Onde:

A =área da seção transversal do tubo no anel de índice i ;

Q = vazão no anel de índice i ;

v = velocidade no anel de índice i .

2.2.2.4. Determinação da vazão, método dos centroides

A determinação da vazão pode utilizar o método dos centroides que requer o levantamento do perfil de velocidade do escoamento em uma tubulação.

O método consiste em dividir a seção do tubo em anéis, em geral cinco, com áreas iguais. Insere-se o equipamento no centro de cada anel, mede-se a velocidade de cada um deles, e então se calcula a vazão total no tubo, como segue:

$$Q = \frac{A}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i \quad (2.3)$$

Onde:

A= área na seção transversal do tubo;

n= número de anéis;

Q= vazão;

v_i = velocidade no anel de índice i.

A Figura 17 exemplifica a subdivisão da seção do tubo em anéis e a Figura 18 exemplifica o levantamento de curva com o perfil de velocidades levantada com o Tubo Pitot Cole.

Figura 17 - Vazão elementar de cada anel

Fonte: PEDRAZI (1992).

Figura 18 - Perfil de velocidades obtido com o Tubo Pitot Cole

FONTE: BUSCARINI (2014).

2.2.2.5. Determinação da vazão instantânea

Para a determinação da vazão instantânea, deve-se considerar a interferência da instalação do Tubo Pitot Cole no escoamento, sendo necessários os seguintes ajustes:

- Correção do diâmetro (C_d): deve-se medir com um calibre, ferramenta que pode ser inserida através do TAP e permite medir o diâmetro do tubo, o diâmetro real interno do tubo e relacioná-lo com o diâmetro nominal;

$$C_d = \frac{\text{Diâmetro real}}{\text{Diâmetro nominal}} \quad (2.4)$$

- Correção pela projeção do TAP (C_t). Ao realizar a instalação do TAP, parte desta peça é lançada internamente ao tubo. Mede-se com o calibre a distância da parede do tubo ao TAP e utiliza-se a Tabela 3 para encontrar o coeficiente correção em função do comprimento da projeção e do diâmetro nominal do tubo;

Tabela 3 - Ajuste devido à projeção do TAP					
Projeção	Diâmetro (mm)				
(mm)	100	150	200	250	300
1	0,9965	0,9984	0,9992	0,9995	0,9996
2	0,9931	0,9968	0,9985	0,9989	0,9993
3	0,9896	0,9953	0,9977	0,9984	0,9989
4	0,9862	0,9937	0,9969	0,9979	0,9986
5	0,9867	0,9921	0,9961	0,9974	0,9982
6	0,9792	0,9905	0,9954	0,9968	0,9979
7	0,9758	0,9889	0,9946	0,9963	0,9975
8	0,9723	0,9874	0,9938	0,9958	0,9971
9	0,9688	0,9858	0,993	0,9953	0,9968
10	0,9654	0,9842	0,9923	0,9947	0,9964
11	0,9619	0,9826	0,9915	0,9942	0,9961
12	0,9585	0,981	0,9908	0,9937	0,9957
13	0,955	0,9795	0,99	0,9931	0,9954

continua

continuação

Projeção (mm)	Diâmetro (mm)				
	100	150	200	250	300
14	0,9515	0,9779	0,9892	0,9926	0,995
15	0,9481	0,9763	0,9885	0,9921	0,9946
16	0,9446	0,9747	0,9877	0,9916	0,9943
17	0,9411	0,9732	0,9869	0,9911	0,9939
18	0,9377	0,9716	0,9861	0,9905	0,9936
19	0,9342	0,97	0,9854	0,99	0,9932
20	0,9308	0,9684	0,9846	0,9895	0,9929

Fonte: (FRANGIPANI; 2007b).

- Área corrigida (A_c). É necessário corrigir a área da seção transversal do tubo considerando sua diminuição devido à introdução da haste do Tubo Pitot Cole. Aplica-se o coeficiente determinado pela Tabela 4 em função do diâmetro nominal do tubo.

Tabela 4 - Ajuste de correção da área

Diâmetro nominal (mm)	Área corrigida (m ²)	Diâmetro nominal (mm)	Área corrigida (m ²)
75	0,004418	650	0,328973
100	0,007527	700	0,381722
125	0,012506	750	0,438424
150	0,017188	800	0,499051
200	0,030673	900	0,632090
250	0,048105	1000	0,780843
275	0,058786	1050	0,861125
300	0,069467	1100	0,945337
350	0,094749	1200	1,125461
375	0,108897	1250	1,221443
400	0,123961	1500	1,760212
450	0,157103	1750	2,397151
500	0,194175	1800	2,536370
550	0,235200	2000	3,132271
600	0,280088		

Fonte: (FRANGIPANI; 2007b).

- Fator de velocidade média (Fv). Relação entre a velocidade média obtida pelo método dos centroides e a velocidade central.

$$Fv = \frac{\text{Velocidade média (método dos centroides)}}{\text{Velocidade na tomada central}} \quad (2.5)$$

Dessa forma, com o Tubo Pitot instalado com as tomadas de pressão na posição central do tubo, pode-se determinar a vazão instantânea (Q) como:

$$Q = Fv \cdot V_c \cdot C_m \cdot A_c \cdot C_t \cdot C_d \quad (2.6)$$

Onde:

V_c = velocidade central.

2.3. CORPOS ROMBUDOS E A CAMADA LIMITE

O princípio de adesão total ou de não escorregamento, um dos princípios fundamentais da Mecânica dos Fluidos, afirma que quando uma parcela de um fluido viscoso entra em contato com uma superfície sólida, sua velocidade se igualará à velocidade da superfície.

Dessa forma, caso a superfície seja fixa ou esteja em repouso, a parcela do fluido em contato com a superfície adquire velocidade nula, enquanto a outra parcela do fluido continua em movimento formando um gradiente de velocidade próximo à parede do corpo sólido. A fina região na qual o gradiente de velocidade é mais intenso e os efeitos da viscosidade do fluidos são importantes, é chamada de camada limite.

Caso o escoamento se depare com um gradiente adverso de pressão, ou exista uma variação muito brusca de geometria, tal como encontrada em cantos vivos ou regiões com raio de curvatura muito pequeno, pode ocorrer a separação da camada limite com relação ao corpo.

Dentro do contexto de separação da camada limite, classifica-se como corpo delgado aquele que apresenta geometria com pouca ou nenhuma parcela de sua superfície em área de separação; e como corpo rombudo, aquele que possui geometria com a maior parte de sua superfície em região de camada limite separada (MENEGUINI; 2002). A Figura 19 ilustra a influência de corpos delgados e rombudos no escoamento de um fluido.

Figura 19 - Corpos delgados e rombudos

Fonte: Blessmann, 1990 *apud* Oliveira, 2011

Em geral, a separação da camada limite ocorre em escoamentos com número de Reynolds a partir de 30 (Blessmann, 1990 *apud* Oliveira, 2011). A posição do descolamento, para corpos rombudos com arestas vivas, ocorre em uma ou algumas arestas. Para os corpos cilíndricos, esse ponto de descolamento é mais complexo, já que depende da rugosidade do objeto e do ambiente, velocidade de escoamento, turbulência, viscosidade, forma e orientação do corpo no escoamento (Oliveira, 2011).

2.4. ENTROPIA MÁXIMA E O PERFIL DE VELOCIDADES

Segundo Chiu (1987), o conceito de entropia máxima é utilizado para fundamentar o mundo determinístico e probabilístico. Possui aplicações na engenharia hidráulica, podendo ser empregado na modelagem da distribuição de velocidades em canais abertos e condutos forçados.

Como base, o conceito afirma que, no estado de equilíbrio, um sistema tende a maximizar a entropia sobre restrições predominantes, isto é: ao maximizar a entropia, estima-se que o evento de maior probabilidade ocorrerá (CHIU, 1987).

Conhecidamente, a equação de Prandtl - von Karmán, utilizada para a modelação do perfil de velocidades, equação 2.7, não satisfaz algumas condições de contorno como o princípio de aderência nas regiões próximas a parede do tubo.

$$\frac{u_{m\acute{a}x} - u}{u^*} = -\frac{1}{k} \ln\left(1 - \frac{r}{R}\right) \quad (2.7)$$

Onde:

k_v = constante de von-Kármán (~0,4)

r = distância radial

R = raio do tubo;

u = velocidade no ponto r ;

$u_{m\acute{a}x}$ = velocidade máxima que pode ocorrer no centro do tubo;

u^* = velocidade de cisalhamento.

Aplicando os conceitos da entropia máxima, Chiu *et al* (1993) propôs uma equação alternativa independente do tipo de escoamento: laminar ou turbulento; e independente das condições das paredes do tubo: lisas ou rugosas, além de atender condições de contorno relatadas anteriormente. Pode-se escrever a equação proposta como:

$$\frac{u}{u_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \right] \quad (2.8)$$

Onde:

M = parâmetro de entropia;

r = distância radial;

R = raio do tubo;

u = velocidade no ponto r ;

$u_{m\acute{a}x}$ = velocidade máxima;

Dividindo-se a vazão, obtida pela integração da Equação (2.8), pela área da seção transversal do tubo, obtém-se uma expressão para a velocidade média na seção que depende apenas do parâmetro de entropia e da velocidade máxima, conforme equação 2.9.

$$\frac{\bar{u}}{u_{m\acute{a}x}} = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (2.9)$$

Apesar da simplicidade da formulação, chama-se atenção para o parâmetro de entropia que é um adimensional que "modela" a distribuição de velocidade.

3. ESTUDO EXPERIMENTAL

A descrição do estudo experimental foi dividida em duas etapas a serem detalhadas nos itens deste capítulo:

- Ensaio preliminar em canal aberto, cujo objetivo foi verificar a viabilidade do formato hexagonal para a medição de velocidade; e
- Ensaio em conduto forçado, cujo objetivo foi verificar a viabilidade do equipamento proposto para medição de vazão nesta condição.

3.1. ENSAIO PRELIMINAR - CANAL ABERTO

3.1.1. O protótipo

O protótipo do medidor de velocidade foi construído a partir de uma barra sextavada, de alumínio, e comprimento de 200 mm. O corpo do equipamento foi transformado em um cilindro oco, mantendo a ponta no formato sextavado e a extremidade fechada.

Internamente ao protótipo, inseriram-se dois tubos flexíveis de nylon com origem em faces opostas, onde foram executados os orifícios de tomada de pressão. A Figura 20 ilustra o esquemático do protótipo e o protótipo utilizado e a Figura 21 ilustra uma das faces do medidor com a tomada de pressão e compara com as tomadas de pressão do tubo Pitot Cole.

Fonte: acervo próprio.

Figura 21 - Tomada de pressão do protótipo e do tubo Pitot Cole

As dimensões do protótipo foram projetadas obedecendo os seguintes critérios:

- **Diâmetro do orifício da tomada de pressão**

O diâmetro do orifício das tomadas de pressão, foi construído com 2,0 mm.

- **Determinação das dimensões do tubo prismático**

O critério determinante para o diâmetro do hexágono adotado foi que este pudesse ser facilmente inserido através de registros de derivação (TAP) que possuem o diâmetro usual de uma polegada. Dessa forma, o diâmetro adotado do protótipo foi de 24 mm.

- **Comprimento da haste do medidor**

O comprimento da haste foi determinado de forma a viabilizar os ensaios para o estudo e atender minimamente a medição em uma tubulação com diâmetro de 200 mm. Este também é um diâmetro comum empregado para distritos de medição e controle (DMC), setores fechados com entrada controlada, que requerem macromedição.

3.1.2. Ensaio de Calibração

O ensaio de calibração do equipamento foi realizado no Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos - CTH, Convênio USP-DAEE.

De forma a simular o escoamento de água em condições controladas, utilizou-se uma bancada composta por um canal circular de seção transversal retangular,

dotada de placas tranquilizadoras instaladas ao longo do canal, evitando que o fluido entre em movimentação e atinja a velocidade de rotação do protótipo.

Em seu eixo encontra-se fixada uma haste giratória conectada a um motor controlado por inversor de frequência, permitindo o controle da velocidade angular. A Figura 22 apresenta o croqui descritivo da bancada de ensaio, e a Figura 23 apresenta a imagem da bancada de ensaio.

Figura 22 – Esquema da bancada de ensaio

Fonte: Adaptado de PEDRAZZI (1992).

Figura 23 - Bancada de ensaio

Fonte: acervo próprio.

O protótipo foi instalado em uma das extremidades da haste giratória a 1,52 m do eixo, onde as faces com as tomadas de pressão ficaram posicionadas perpendicularmente à trajetória circular e com profundidade fixa. A velocidade tangencial foi determinada pela relação entre o espaço percorrido, e o tempo gasto que foi medido por meio de um cronômetro digital.

Para a determinação do diferencial de pressão, foi utilizado um manômetro em forma de U invertido, fixado na parte superior da haste giratória. Para a leitura instalou-se um celular posicionado frontalmente ao manômetro U e utilizado água como líquido manométrico, viabilizando a gravação e leitura dos dados do diferencial de pressão, como ilustrado pela Figura 24.

Figura 24- Ensaio de calibração

Fonte: acervo próprio.

3.2. ENSAIO - CONDUTO FORÇADO

3.2.1. O protótipo

O protótipo do medidor de vazão foi construído a partir de uma barra hexagonal de cobre. Esta foi torneada de forma a manter seu interior oco possibilitando a inserção quatro tubos de cobre idênticos, sem conexão entre eles, com diâmetro de 3,97 mm cada, com origem em faces opostas, onde foram executados os orifícios de tomada de pressão. A Figura 25 ilustra esta primeira etapa da construção, sendo visível os tubos de tomada de pressão.

Figura 25 - Primeira etapa da confecção do protótipo

Fonte: acervo próprio.

Com o intuito de instalar o equipamento em uma tubulação, este foi inserido entre flanges de PVC com diâmetro nominal de 150 mm, Figura 26.

Figura 26 - Protótipo elaborado para a medição de vazão, flanges de PVC

Fonte: acervo próprio.

- **Diâmetro dos orifícios das tomadas de pressão**

O diâmetro do orifício das tomadas de pressão, foi construído com 2,4 mm.

- **Posição dos orifícios das tomadas de pressão**

O primeiro par de tomadas de pressão foi construído na posição central, considerando obter medições próximas à velocidade máxima. O segundo par de tomadas de pressão foi construído próximo à parede do tubo, à posição de 62 mm do eixo, considerando obter medições próximas à velocidade média. O cálculo para determinar a posição das tomadas periféricas encontra-se no Apêndice A.

- **Determinação das dimensões do tubo prismático**

Dado o diâmetro da tubulação a ser utilizado no ensaio, DN 150 mm, propôs-se utilizar um tubo que ocasionasse mínima obstrução, o diâmetro do prisma hexagonal utilizado foi de 14,5 mm.

3.2.2. Aferição do protótipo

O protótipo foi instalado em uma bancada no Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos - CTH, Convênio USP-DAEE, contendo um circuito composto por duas válvulas gaveta, tubulação retilínea (que foi o ponto de instalação do protótipo) e conexão ao vertedor triangular com caixa aferida, Figura 28. Detalhes do preparo para instalação do protótipo encontram-se na Figura 27.

Figura 27 - Preparo para instalação do protótipo na tubulação.

Fonte: acervo próprio.

Figura 28 - Bancada de ensaio com o protótipo instalado

Fonte: acervo próprio.

O vertedor triangular, cuja capacidade máxima é 50 L/s, foi utilizado para aferir os dados de medição de vazão. A alimentação do circuito foi realizada com água à temperatura ambiente, através de um reservatório de nível constante situado a uma cota de 8,0 m em relação do eixo do tubo.

A variação da vazão deu-se através de graduações no registro de gaveta instalado a jusante do protótipo e a montante do vertedor. Para cada vazão foram lidos os valores das leituras da lâmina de água no vertedor triangular assim como as leituras dos diferenciais de pressão referentes às tomadas centrais e periféricas dos manômetros diferenciais. Considerando aumentar o diferencial de pressão e assim diminuir o erro nas leituras, inclinou-se o quadro de manômetros e anotou-se o grau de inclinação.

4. TRATAMENTO ANALÍTICO

Este capítulo aborda os tratamentos analíticos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

4.1. O MODELO CONCEITUAL PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE

Apresenta-se o equacionamento para o Tubo Pitot, amplamente abordado em livros de Mecânica dos Fluidos e, de forma análoga, apresenta-se o equacionamento modelado para o protótipo de tomadas de pressão prismática hexagonal.

4.1.1. Hipóteses

Para o desenvolvimento do equacionamento, são consideradas as seguintes hipóteses:

- Escoamento em regime permanente;
- Fluido incompressível;
- Escoamento sem atrito;
- E escoamento ao longo de uma linha de corrente.

4.1.2. Tubo Pitot

Figura 29 - Esquema da sonda do Pitot Clássico

Fonte: acervo próprio.

A primeira etapa é aplicar a equação de Bernoulli para determinar a pressão de estagnação ou carga total no ponto (1).

$$h_1 = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z_1 \quad (4.1)$$

Chama-se atenção de que na equação (4.1), $\frac{v^2}{2g}$ é o acréscimo de pressão devido à estagnação em (1).

Analogamente aplica-se a equação de Bernoulli para o ponto (2):

$$h_2 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (4.2)$$

Como no ponto (2) é medida apenas a pressão estática, a velocidade v_2 é nula.

Ainda, $z_1 = z_2 = z$, e $p_1 = p_2 = p$.

Portanto, fazendo-se a diferença entre as cargas, tem-se que:

$$h_1 - h_2 = \Delta h = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z - \frac{p}{\rho g} - z \quad (4.3)$$

E encontra-se a equação para a determinação da velocidade:

$$v = \sqrt{2g\Delta h} \quad (4.4)$$

Onde:

g = aceleração da gravidade;

h_1, h_2 = altura piezométrica em 1,2;

p_1, p_2 = pressão em 1,2;

v_1, v_2 = velocidade em 1,2;

z_1, z_2 = cota na tomada de pressão 1, 2;

Δh = diferencial de pressão.

4.1.3. Aplicação do Modelo Matemático ao Protótipo Ensaiado

Apresenta-se o modelo desenvolvido para a determinação da velocidade através do protótipo elaborado.

Figura 30 - Esquema das tomadas de pressão do protótipo

Fonte: acervo próprio.

Semelhante ao modelo do Tubo Pitot, aplica-se Bernoulli a ambos os pontos (1) e (2) separadamente:

$$h_1 = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z_1 \quad (4.5)$$

$$h_2 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (4.6)$$

Onde $\frac{v^2}{2g}$ é o acréscimo de pressão devido à estagnação em (1).

Por estar posicionada na face oposta, a velocidade v_2 , na tomada (2), é nula. No entanto, a pressão p_2 é menor que p_1 devido ao efeito de sucção de pelo menos uma fração do termo cinético $\frac{v^2}{2g}$ representado por k na equação (4.7), onde $0 < k < 1$.

Dessa forma, pode-se adotar que:

$$\frac{p_2}{\rho g} = \left(\frac{p_1}{\rho g} - k \frac{v^2}{2g} \right) \quad (4.7)$$

Assim, a carga total h_2 pode ser expressa por:

$$h_2 = \left(\frac{p_1}{\rho g} - k \frac{v^2}{2g} \right) + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (4.8)$$

Como $z_1 = z_2$ e $\frac{v_2^2}{2g} = 0$, a diferença entre as equações (4.5) e (4.8) é dada por:

$$h_1 - h_2 = \Delta h = \frac{v^2}{2g} (1 + k) \quad (4.9)$$

E obtém-se a equação da velocidade:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1+k}} \sqrt{2g\Delta h} \quad (4.10)$$

Salienta-se a existência do coeficiente de correção (k), imposto pelo equipamento, que permite que o diferencial de pressão seja maior com relação ao Tubo Pitot Clássico, o que diminui o erro nas leituras.

4.1.4. Análise da consistência

De forma a analisar a consistência da equação (4.10), impõe-se o diferencial de pressão igual a zero (mH₂O), e obtém-se velocidade igual a zero (m/s) assegurando confiabilidade no resultado obtido.

O segundo teste de consistência realizado analisa adimensionalmente a equação (4.10) onde "L" refere-se à dimensão de comprimento e "T" refere-se à dimensão de tempo, como segue:

$$\left(\frac{L}{T}\right) = \sqrt{\left(\frac{L}{T^2}\right)} \cdot L \rightarrow \left(\frac{L}{T}\right) = \left(\frac{L}{T}\right) \quad (4.11)$$

Este resultado também assegura a confiabilidade da equação (4.10).

4.2. DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO DE ENTROPIA

Dada a equação da entropia máxima que modela o perfil de velocidades, conhecendo-se a posição das tomadas de pressão do protótipo construído para o ensaio em conduto forçado, considerou-se utilizar o instrumento para determinar a velocidade em uma tubulação sem a necessidade de calibração.

Para o alcance deste objetivo, faz-se necessário determinar o parâmetro de entropia, que foi realizado através dos seguintes equacionamentos.

Sendo as equações para o cálculo de velocidade do protótipo:

$$u_{m\acute{a}x} = C \sqrt{2g\Delta h_0} \quad (4.12)$$

$$\bar{u} = C \sqrt{2g\Delta h_1} \quad (4.13)$$

Onde:

C = coeficiente de ajuste do equipamento;

g = aceleração da gravidade;

$\Delta h_0, \Delta h_1$ = diferencial de pressão na tomada e pressão central, periférica;

$\bar{u}$ = velocidade média;

$u_{m\acute{a}x}$ = velocidade máxima;

Assumindo que o coeficiente de ajuste do equipamento é constante, pode-se reescrever a relação entre as equações (4.12) e (4.13) como:

$$\frac{\bar{u}}{u_{m\acute{a}x}} = \sqrt{\frac{\Delta h_1}{\Delta h_0}} \quad (4.14)$$

Sendo a equação da entropia máxima:

$$\frac{\bar{u}}{u_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \cdot \left(1 - \frac{\bar{r}^2}{R^2} \right) \right] \quad (4.15)$$

Onde:

e = base neperiana;

M = parâmetro de entropia;

$\bar{r}$ = distância entre o centro do tubo e a tomada de pressão periférica;

R = raio do tubo.

Substituindo-se a equação (4.14), na equação (4.15), esta pode ser reescrita como:

$$\frac{e^{M \cdot \sqrt{\frac{\Delta h_1}{\Delta h_0}}} - 1}{e^M - 1} = 1 - \frac{\bar{r}^2}{R^2} \quad (4.16)$$

Dado que $\left(\frac{\bar{r}}{R}\right)^2 = 0,632$ (Equação A.9 - Apêndice A), e introduzindo-se a notação

$a = \sqrt{\frac{\Delta h_1}{\Delta h_0}}$, a equação (4.16) fica expressa como:

$$\frac{e^{M \cdot a} - 1}{e^M - 1} = 0,3679 \quad (4.17)$$

Evidenciando-se o termo "a", obtém-se:

$$a = \frac{\ln(e^M \cdot 0,3679 - 0,6321)}{M} \quad (4.18)$$

A partir da equação (4.18) construiu-se uma planilha considerando os valores de "M", com passo de 0,005, e "a" que satisfazem a equação. Esta planilha foi utilizada para obter-se o valor de "M" a partir do conhecimento de "a".

Os valores de "M" e "a" estão exemplificados no Apêndice B.

4.3.DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE PELA MEDIÇÃO NA TOMADA CENTRAL

Para a determinação da velocidade do escoamento, medindo-se apenas o diferencial de pressão das tomadas centrais, faz-se necessária a calibração do equipamento.

Desta forma apresenta-se o cálculo com o intuito de obter-se a relação entre a velocidade média e velocidade máxima.

O equacionamento inicia-se formulando o número de Reynolds para velocidade média e máxima:

$$Re = \frac{\bar{u} \cdot D}{\nu} \quad (4.19)$$

$$Re_{m\acute{a}x} = \frac{u_{m\acute{a}x} \cdot D}{\nu} \quad (4.20)$$

E a equação da entropia máxima que possui apenas duas variáveis para determinação da velocidade média:

$$\frac{\bar{u}}{u_{m\acute{a}x}} = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (4.21)$$

Onde:

D = diâmetro do tubo;

e = base neperiana;

M = parâmetro de entropia;

Re = número de Reynolds (para velocidade média);

$Re_{m\acute{a}x}$ = número de Reynolds (para velocidade máxima);

$\bar{u}$ = velocidade média;

ν = viscosidade cinemática do fluido.

Reescreve-se a equação 4.21 utilizando as equações 4.19 e 4.20:

$$\frac{Re}{Re_{m\acute{a}x}} = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (4.22)$$

Conhecendo-se o ajuste da equação de Reynolds para a entropia máxima (informação pessoal)¹:

$$\frac{Re^{0,9995}}{422,377} = e^M - 1 \quad (4.23)$$

Introduzindo-se a variável "W" como a seguir, tem-se:

$$W = e^M - 1 \quad (4.24)$$

$$e^M = W + 1 \quad (4.25)$$

$$M = \ln(W + 1) \quad (4.26)$$

A equação (4.22) pode então ser reescrita como:

$$\frac{Re}{Re_{m\acute{a}x}} = \frac{W + 1}{W} - \frac{1}{\ln(W + 1)} \quad (4.27)$$

Ou ainda:

$$Re_{m\acute{a}x} = \frac{Re}{\frac{W+1}{W} - \frac{1}{\ln(W+1)}} \quad (4.28)$$

De forma a obter o valor de Re em função de $Re_{m\acute{a}x}$ elaborou-se uma tabela, com os valores de Reynolds entre $5,0 \times 10^3$ e $1,0 \times 10^8$, "W" e Reynolds máximo. Dos valores, obteve-se a relação ajustada:

$$\ln Re = -0,0036(\ln Re_{m\acute{a}x})^2 + 1,1267(\ln Re_{m\acute{a}x}) - 1,1931 \quad (4.29)$$

Com índice de determinação $r^2=0,99999$.

¹ Equação fornecida pelo orientador deste trabalho Podalyro Amaral de Souza, São Paulo, em julho de 2016.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram organizados em três etapas:

- Referente à viabilidade do formato hexagonal;
- Referente à viabilidade do formato hexagonal para medição de vazão sem calibração do equipamento; e
- Referente à viabilidade do formato hexagonal para medição de vazão com calibração do equipamento.

5.1. VIABILIDADE DO FORMATO HEXAGONAL

Esta etapa do trabalho analisa os resultados obtidos para o primeiro protótipo, ensaiado em canal, com o objetivo de avaliar a viabilidade do formato hexagonal.

A Tabela 5 apresenta os dados medidos no ensaio de calibração, apresentando o número de rotações, o tempo gasto para o equipamento realizar as rotações e alturas manométricas referentes às tomadas de pressão 1 e 2 considerando o ensaio realizado em canal aberto.

Tabela 5 - Medições realizadas no ensaio de calibração

Nº do ensaio	Nº de rotações	Tempo (s)	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)
1	5	70,53	395,8	399,5
2	5	58,31	394,9	400,2
3	6	62,86	394,3	400,8
4	7	66,72	393,3	401,7
5	7	61,08	392,6	402,2
6	8	64,58	391,7	403,1
7	8	57,86	390,3	404,3
8	8	54,06	389,3	405,4
9	8	50,71	388,2	406,4
10	10	59,93	386,9	407,6

A partir da equação (4.10), pode-se definir o coeficiente de velocidade, C_v , como:

$$C_v = \frac{1}{\sqrt{1+k}} \quad (5.1)$$

Pode-se então escrever que:

$$v = C_v \sqrt{2g\Delta h} \quad (5.2)$$

A partir da equação (5.2) fica evidente que o termo cinético, $\frac{v^2}{2g}$, deve ser proporcional ao diferencial de pressão (Δh) e à constante de proporcionalidade é C_v^2 , isto é:

$$\frac{v^2}{2g} = C_v^2 \cdot \Delta h \quad (5.3)$$

Na Figura 31 está a representação dos valores experimentais de $\frac{v^2}{2g}$ contra Δh , valores estes calculados a partir da Tabela 5.

Observa-se que os pontos experimentais ajustam-se bem a uma reta cuja tangente corresponde ao valor de C_v^2 . Numericamente, obteve-se $C_v^2 = 0,6308$ ou $C_v = 0,794$. Assim, de modo preliminar, a lei de aferição do medidor proposto é:

$$v = 0,794 \sqrt{2g\Delta h} \quad (5.4)$$

A dispersão experimental associada aos valores de C_v está apresentada na Figura 32 em função do número de Reynolds expresso em termos do diâmetro circunscrito ao prisma do protótipo (d), e da velocidade "teórica" ($\sqrt{2g\Delta h}$), dado pela equação (5.5).

$$Re = \frac{d\sqrt{2g\Delta h}}{v} \quad (5.5)$$

O valor do coeficiente de velocidade do protótipo testado, $C_v = 0,794$, difere do valor histórico clássico do Pitot Cole que é $C_v = 0,870$, o que não acarreta dificuldade e ainda eleva o valor de Δh , diminuindo a incerteza relativa da medição.

Ressalta-se que o protótipo proposto apresentou-se bem estável em termos de valores de C_v , notadamente para $Re > 33.000$ ($v > 1,09$ m/s).

Considerando que os resultados indicaram a viabilidade do formato prismático hexagonal para a medição de vazão, o estudo voltou-se para um novo protótipo, a ser ensaiado em conduto forçado.

5.2. VIABILIDADE DO PROTÓTIPO PARA A MEDIÇÃO DE VAZÃO - SEM CALIBRAÇÃO

Primeiramente calculou-se a vazão no vertedor utilizando-se a fórmula teórica de Thompson (eq. 5.6). O valor da altura da lâmina de água foi ajustado segundo a equação (5.7):

$$Q_v = 1,42 \cdot (H_v)^{5/2} \quad (5.6)$$

$$H_v = L_v - 0,1441 \quad (5.7)$$

Onde:

H_v = ajuste da altura da lâmina de água no vertedor triangular;

L_v = leitura da ponta limnimétrica ajustada à superfície livre da água no vertedor;

Q_v = vazão do vertedor;

E o valor 144,1 (mm) é a leitura da ponta limnimétrica ajustada ao vértice do vertedor.

A Tabela 6 apresenta o valor da vazão média calculada através do vertedor (Q_v) e as leituras realizadas para sua obtenção.

Tabela 6 - Medições no vertedor realizadas no ensaio de calibração

Nº	L_v (mm)	H_v (m)	Q_v (m³/s)
1	294,3	0,150	0,01242
2	335,6	0,192	0,02279
3	333,8	0,190	0,02226
4	330,0	0,186	0,02116
5	321,9	0,178	0,01893
6	303,1	0,159	0,01432
7	275,2	0,131	0,00884

Seguindo para as medições realizadas para o ensaio com o protótipo, dado o ângulo aplicado ao quadro de manômetros, o diferencial de pressão foi corrigido conforme equação (5.8).

$$\Delta h = |h_1 - h_2| \cdot \sin(\theta) \quad (5.8)$$

Onde:

h_1, h_2 = leitura piezométrica em 1,2 (tomadas centrais do medidor);

Δh = diferencial de pressão;

θ = ângulo do quadro,

Visando determinar o parâmetro de entropia e então determinar a velocidade média, calculou-se o valor de "a". A Tabela 7 apresenta as leituras piezométricas das tomadas centrais e periféricas, o ângulo de inclinação do quadro de manômetros para a leitura do diferencial de pressão, o diferencial de pressão nas tomadas centrais e periféricas, e o valor de "a".

Tabela 7 - Determinação de "a"

Ensaio	h_{0-1} (mm)	h_{0-2} (mm)	h_{1-1} (mm)	h_{1-2} (mm)	θ (°)	Δh_1 (m)	Δh_0 (m)	a
1	222	338	270	370	29,6	0,057	0,049	1,077
2	43	427	115	449	29,6	0,190	0,165	1,072
3	20	365	90	405	29,6	0,170	0,156	1,047
4	98	427	53	339	29,6	0,163	0,141	1,073
5	101	367	182	410	29,6	0,131	0,113	1,080
6	250	398	65	193	29,6	0,073	0,063	1,075
7	156	217	235	285	29,6	0,030	0,025	1,105

Onde:

h_{0-1}, h_{0-2} = leitura piezométrica em 1,2 (tomadas centrais do medidor);

h_{1-1}, h_{1-2} = leitura piezométrica em 1,2 (tomadas periféricas do medidor);

$\Delta h_0, \Delta h_1$ = diferencial de pressão na tomada e pressão central, periférica;

θ = ângulo de inclinação do quadro de manômetros.

Chama-se a atenção para os valores obtidos para "a", que ficaram entre 1,04 e 1,11, o que levaria a parâmetros de entropia muito elevados. Entretanto, segundo a vazão obtida com o vertedor, esperava-se que o parâmetro de entropia "M" estivesse entre 5,0 e 6,5, e "a" entre 0,80 e 0,84.

Da análise dos resultados obtidos neste ensaio, constatou-se que as tomadas periféricas apresentaram influência do medidor próximo à parede do tubo, o que inviabilizou sua aplicação no trabalho.

Dessa forma, o estudo foi conduzido para a calibração do equipamento utilizando-se apenas as tomadas de pressão centrais.

5.3. VIABILIDADE DO PROTÓTIPO PARA A MEDIÇÃO DE VAZÃO - COM CALIBRAÇÃO

O processo para a determinação da lei de aferição do protótipo, assim como no experimento sem calibração, iniciou-se com a determinação da vazão obtida através do vertedor triangular aplicando as equações (5.6) e (5.7).

A Tabela 8 apresenta os dados de leitura com a ponta limnimétrica ajustada ao vértice do vertedor (L_v); a lâmina de água no vertedor triangular (H_v) e a vazão do vertedor (Q_v).

Tabela 8 - Medições no vertedor realizadas no ensaio de calibração

Nº	L_v (mm)	H_v (m)	Q_v (m³/s)
1	294,3	0,150	0,01242
2	335,6	0,192	0,02279
3	333,8	0,190	0,02226
4	330,0	0,186	0,02116
5	321,9	0,178	0,01893
6	303,1	0,159	0,01432
7	275,2	0,131	0,00884
8	258,5	0,114	0,00629
9	259,5	0,115	0,00642
10	287,0	0,143	0,01096
11	307,9	0,164	0,01542
12	235,2	0,091	0,00356
13	241,8	0,098	0,00424
14	246,1	0,102	0,00472
15	256,3	0,112	0,00599
16	262,7	0,119	0,00688
17	273,5	0,129	0,00855
18	278,7	0,135	0,00944
19	283,8	0,140	0,01036
20	288,4	0,144	0,01123
21	295,8	0,152	0,01273
22	301,8	0,158	0,01402
23	304,5	0,160	0,01463
24	307,4	0,163	0,01530
25	309,7	0,166	0,01585

Em paralelo, analisando os dados para o protótipo ensaiado, primeiramente corrigiu-se o diferencial de pressão conforme equação (5.8).

Calculou-se o número de Reynolds considerando a vazão média do vertedor (Q_v), o diâmetro do tubo (D), a viscosidade cinemática (ν) e a área da seção transversal do tubo (A).

$$Re = \frac{Q_v \cdot D}{\nu \cdot A} \quad (5.9)$$

Através da equação (4.29), que relaciona os números de Reynolds referentes à vazão média e à vazão máxima, obteve-se o valor do Reynolds referente à vazão máxima.

Então calculou-se a velocidade máxima e aplicou-se a equação que determina a velocidade para o equipamento, de forma a se obter o coeficiente de ajuste (C_p) de cada ensaio.

$$u_{m\acute{a}x} = \frac{Re_{m\acute{a}x} \cdot \nu}{D} \quad (5.10)$$

$$u_{m\acute{a}x} = C_p \cdot \sqrt{2g\Delta h} \quad (5.11)$$

Onde:

C_p = coeficiente de ajuste do protótipo;

D = diâmetro do tubo;

g = aceleração da gravidade;

Re = número de Reynolds (para velocidade média);

$Re_{m\acute{a}x}$ = número de Reynolds (para velocidade máxima);

Δh = diferencial de pressão;

$u_{m\acute{a}x}$ = velocidade máxima;

ν = viscosidade cinemática do fluido;

A Tabela 9 apresenta os dados obtidos através do ensaio de calibração, com o número do ensaio; leitura das tomadas de pressão centrais, ângulo da leitura do quadro de manômetros, diferencial de pressão corrigido, números de Reynolds para vazão média e máxima, velocidade máxima e coeficiente de calibração calculado para cada ensaio.

Tabela 9 - Medições realizadas no ensaio de calibração

Nº Ensaio	h_1 (mm)	h_2 (mm)	θ (°)	Δh (m)	Re	$Re_{m\acute{a}x}$	$u_{m\acute{a}x}$ (m/s)	C_p
1	222	338	29,6	0,057	101.332,49	124.053,77	0,795	0,750
2	43	427	29,6	0,190	185.992,66	222.420,92	1,426	0,739
3	20	365	29,6	0,170	181.652,84	217.419,58	1,394	0,762
4	98	427	29,6	0,163	172.692,05	207.081,38	1,327	0,744
5	101	367	29,6	0,131	154.491,03	186.031,03	1,193	0,743
6	250	398	29,6	0,073	116.833,31	142.216,42	0,912	0,761

continua

continuação

Nº Ensaio	h_1 (mm)	h_2 (mm)	θ (°)	Δh (m)	Re	$Re_{máx}$	$u_{máx}$ (m/s)	C_p
7	156	217	29,6	0,030	72.124,13	89.554,60	0,574	0,747
8	245	276	29,2	0,015	51.302,55	64.657,92	0,414	0,767
9	245	276	29,2	0,015	52.431,03	66.015,83	0,423	0,777
10	300	392	29,2	0,045	89.465,26	110.085,52	0,706	0,752
11	299	473	29,2	0,085	125.851,56	152.745,85	0,979	0,759
12	251	262	30	0,006	29.031,52	37.573,40	0,241	0,733
13	247	262	30	0,008	34.578,83	44.379,99	0,284	0,742
14	255	272	30	0,009	38.510,07	49.176,16	0,315	0,772
15	264	292	30	0,014	48.871,54	61.728,74	0,396	0,755
16	266	302	30	0,018	56.141,70	70.473,21	0,452	0,760
17	283	340	30	0,029	69.808,70	86.800,73	0,556	0,744
18	296	365	30	0,035	77.034,72	95.384,63	0,611	0,743
19	312	394	30	0,041	84.540,51	104.270,49	0,668	0,745
20	260	355	30	0,048	91.672,63	112.688,28	0,722	0,748
21	285	407	30	0,061	103.881,41	127.046,45	0,814	0,745
22	143	287	30	0,072	114.459,83	139.440,85	0,894	0,752
23	151	307	30	0,078	119.422,12	145.241,67	0,931	0,753
24	165	339	30	0,087	124.893,35	151.628,28	0,972	0,744
25	176	360	30	0,092	129.337,57	156.809,32	1,005	0,748

Para a obtenção do valor do coeficiente de calibração do protótipo, calculou-se a equação da reta através dos valores experimentais da velocidade máxima *versus* o diferencial de pressão, representados graficamente na Figura 33.

Figura 33 - Determinação do coeficiente de calibração

A equação $y = 0,7496.x$, obtida por ajuste por mínimos quadrados, equivale à equação (5.11), o que leva ao coeficiente de ajuste igual a 0,7496, com um índice de determinação de 0,9994.

A equação (5.12) apresenta a lei de aferição obtida para o equipamento:

$$u_{máx} = 0,7496 \sqrt{2g\Delta h} \quad (5.12)$$

Aponta-se que a velocidade máxima ensaiada foi de 1,43 m/s. Objetivava-se ensaiar velocidades compreendidas entre 0,00 m/s até 3,00 m/s, entretanto, devido às limitações da instalação, com elevado número de conexões com flanges, para valores elevados do diferencial de pressão, ocasionou a entrada de ar de difícil detecção levando a erros no ensaio.

5.3.1. Algoritmo para a obtenção da vazão

Elucidando, apresenta-se o algoritmo para determinar a vazão utilizando o instrumento proposto.

- Dados de entrada: diâmetro do tubo (D), aceleração da gravidade (g) e viscosidade cinemática (ν).
- Medir o diferencial de pressão (Δh);
- Calcular a velocidade máxima ($u_{máx}$) conforme a equação (5.12);

- Calcular o número de Reynolds para a velocidade máxima ($Re_{m\acute{a}x}$) conforme a equação (4.20);
- Calcular o número de Reynolds (Re) conforme a equação (4.29);
- Calcular a velocidade média ($\bar{u}$) conforme a equação (4.19);
- Calcular a vazão (Q) conforme a seguinte equação (5.13):

$$Q = \frac{\bar{u} \cdot \pi \cdot D^2}{4} \quad (5.13)$$

Na Figura 34 encontra-se a vazão obtida com o vertedor e a vazão medida com o protótipo. É notável a proximidade entre os resultados obtidos tendo a incerteza variado entre -3,7% e 2,3%.

5.3.2. Cálculo das incertezas

Tendo o conjunto de erros advindos dos ensaios, calculou-se a incerteza expandida para a determinação do coeficiente de ajuste.

O cálculo foi realizado primeiramente para a incerteza expandida da medição de vazão do vertedor; incerteza expandida na determinação do diâmetro do tubo de PVC; e a incerteza expandida associada ao coeficiente de calibração do protótipo.

- Incerteza na determinação da vazão

Considerando a fórmula teórica de Thompson utilizada para a determinação de vazão através do vertedor, aplicaram-se as seguintes transformações e aproximações:

$$Q = K \cdot H^{5/2} \quad (5.14)$$

$$\ln Q = \ln K + \frac{5}{2} \ln H \quad (5.15)$$

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dK}{K} + \frac{5}{2} \frac{dH}{H} \quad (5.16)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \pm \frac{5}{2} \left| \frac{\Delta H}{H} \right| \quad (5.17)$$

Onde:

H = altura da lâmina de água no vertedor;

K = constante de aferição do vertedor ;

Q = vazão obtida através do vertedor ;

Como a medida da altura piezométrica foi realizada através de uma ponta limnimétrica cuja menor divisão da escala é 0,1 mm, este valor foi associado ao ΔH . Já o valor de H corresponde ao intervalo de leitura realizado, tendo variado entre 0,0911 m e 0,1915 m.

Aplicando-se os valores à equação (5.17), tem-se que:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \pm \frac{5}{2} \left(\frac{0,0001}{0,0911} \right) = 0,00274 \quad (5.18)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \pm \frac{5}{2} \left(\frac{0,0001}{0,1915} \right) = 0,00131 \quad (5.19)$$

Sendo a incerteza associada à vazão de $\pm 0,274\%$, o maior valor encontrado.

2) Diâmetro

A determinação do diâmetro, realizada pelo CTH, aplicou o método da pesagem, segundo a equação (5.20).

$$P = \rho \cdot g \cdot V \quad (5.20)$$

Para uma tubulação de seção circular, a equação pode ser rescrita como:

$$\frac{P}{\rho \cdot g} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} L \quad (5.21)$$

$$D = \left(\frac{4(P)}{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.22)$$

Onde:

D = diâmetro do tubo;

g = aceleração da gravidade;

L = comprimento do tubo;

P = peso;

V = volume;

ρ = massa específica da água a 22°C.

Seguindo o mesmo procedimento, determinou-se a incerteza associada à determinação do diâmetro.

$$\ln D = \frac{1}{2} [\ln 4 + \ln(P) - \ln(\rho \cdot g \cdot \pi) - \ln(L)] \quad (5.23)$$

$$\frac{dD}{D} = \frac{1}{2} \left[\frac{D(P)}{P} - \frac{dL}{L} \right] \quad (5.24)$$

$$\frac{\Delta D}{D} = \pm \frac{1}{2} \left[\left| \frac{\Delta P}{P} \right| + \left| \frac{\Delta L}{L} \right| \right] \quad (5.25)$$

Dado o comprimento do tubo ($L=0,8065\text{m}$) e a precisão da leitura ($\Delta L=0,0005\text{m}$); assim como o peso medido ($P=15,58\text{kgf}$) e o fundo de escala da balança ($\Delta P = 0,01\text{kgf}$), tem-se a incerteza de $\pm 0,063\%$.

c) Aferição do protótipo

Sendo a velocidade máxima descrita segundo as equações (5.26) e (5.27):

$$u_{\max} = C \sqrt{2g\Delta h} \quad (5.26)$$

$$u_{\max} = \left(\frac{kQ^4}{\pi D^2} \right) \quad (5.27)$$

Onde:

C = coeficiente de ajuste do protótipo;

D = diâmetro do tubo;

g = aceleração da gravidade;

k = constante de ajuste;

Q = vazão;

Δh = diferencial de pressão;

Realizando-se o cálculo para incertezas, tem-se:

$$\ln\left(\frac{kQ^4}{\pi D^2}\right) = \ln C + \frac{1}{2} \ln(2g\Delta h) \quad (5.27)$$

$$\ln\left(\frac{k^4}{\pi}\right) + \ln Q - 2 \ln D = \ln C + \frac{1}{2} \ln(2g\Delta h) \quad (5.28)$$

$$\frac{dQ}{Q} - 2 \frac{dD}{D} = \frac{dC}{C} + \frac{1}{2} \frac{d(\Delta h)}{\Delta h} \quad (5.29)$$

$$\frac{\Delta C}{C} = \pm \left\{ \left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| + 2 \left| \frac{\Delta D}{D} \right| + \frac{1}{2} \left| \frac{\Delta(\Delta h)}{\Delta h} \right| \right\} \quad (5.30)$$

Tendo como o menor diferencial de pressão medido ($\Delta h = 0,011m$) e o fundo de escala ($\Delta(\Delta h) = 0,001m$), a incerteza associada à calibração é de 4,95%.

Observa-se que o método utilizado para a leitura do diferencial de pressão corresponde significativamente à maior fonte de incertezas realizada no ensaio, entretanto, ressalta-se que o ajuste da equação de calibração obteve o índice de determinação de 0,9994.

6. CONCLUSÕES

O medidor de vazão proposto, baseado no princípio de funcionamento de um tubo Pitot Cole, construído sobre um prisma de seção hexagonal, apresentou resultados bastante satisfatórios.

Esta afirmação está corroborada pelo comportamento linear apresentado pela lei de aferição do medidor com índice de determinação $r^2=0,9994$ indicando a qualidade do resultado obtido.

Pode-se justificar a forte correlação linear do ajuste, ainda que para pequenas vazões, devido ao formato do medidor. Além de ser uma geometria simples e robusta, a existência da aresta inferior e superior assegura o descolamento da camada limite para escoamento turbulento a jusante.

Outro aspecto importante a ser realçado refere-se ao primeiro dispositivo construído com maiores dimensões, aferido em um canal, e ao segundo dispositivo, com dimensões menores, que operou em conduto forçado. Estes apresentaram valores diferentes para o coeficiente de velocidade: 0,794 para aferição no canal e 0,7496 para aferição no conduto forçado. Explica-se a diferença encontrada pela condição de confinamento que só existe no conduto forçado.

Ainda, o coeficiente de velocidade de ambos os protótipos ensaiados é menor do que o do tubo Pitot Cole, o que faz com que aumente o diferencial de pressão e diminua o erro do equipamento.

É importante relatar que a tentativa para se obter uma lei para a velocidade máxima (no eixo do tubo), utilizado-se as duas diferenças de pressão, tomadas de pressões centrais e periféricas, sem necessidade do conhecimento do coeficiente de velocidade, não foi exitosa. Tal fato justifica-se pois a medição do diferencial de pressão próximo à parede do tubo foi fortemente afetada pelo efeito de parede. Portanto o trabalho foi direcionado para a aferição do dispositivo visando a obtenção do coeficiente de velocidade, usando-se tão somente as diferenças piezométricas das tomadas de pressão centrais.

Uma vez aferido o medidor para a lei de velocidade máxima no eixo do tubo, a obtenção da vazão pode ser feita pelo algoritmo expresso no item 5.3.1 deste trabalho.

A incerteza máxima observada para as vazões obtidas por este equipamento foi de 4,95%, o que ocorre para pequenos diferenciais de pressão.

A aplicação do instrumento proposto elimina erros provenientes do levantamento de perfil, projeção do TAP e coeficiente de área que podem ocorrer na instalação do tubo Pitot Cole.

Mesmo com os bons resultados apresentados por este novo medidor, alerta-se que há um limite de aplicabilidade relacionado à área da seção transversal do tubo (A) e à área projetada do equipamento (A_p). A aplicação da calibração do equipamento restringe-se à relação ($A_p/A=0,1183$).

Por fim, conclui-se que a geometria prismática hexagonal apresentou-se adequada para a realização de medições de vazão imprimindo confiabilidade, simplicidade e robustez no projeto, mantendo as vantagens de aplicação do tubo Pitot Cole com baixo custo e facilidade de aplicação.

7. RECOMENDAÇÕES

Como observado nas conclusões, o valor encontrado experimentalmente para o coeficiente de velocidade do medidor proposto vale somente para a relação de área $A_p/A=0,1183$.

Recomenda-se que outras relações entre as áreas sejam ensaiados em futuras pesquisas para se determinar a dependência do coeficiente de velocidade de (A_p/A) .

Para efeito de aplicação, recomenda-se calcular a perda de carga imposta pelo equipamento.

8. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10396**: Medidores de vazão de fluidos. Rio de Janeiro, 1988.
- ALEGRE, H. *et al.* **Indicadores de Desempenho para Serviços de Abastecimento de Água**. Reino Unido: IWA Publishing, 2000, 188p.
- ALMEIDA, A. S.; SOUZA, V. C. **An alternative method for measuring velocities in open-channel flows: performance evaluation of a Pitot tube compared to an acoustic meter**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v.22. e26. 2017.
- ANDERSON JR., J. **Fundamentos de Engenharia Aeronáutica: Introdução ao voo**. 7 ed. AMGH Editora LDTA, 2015.
- American Water Works Association - AWWA. **Flowmeters in Water Supply**. 1ª edição, Denver, American Water Works Association, 1989.
- American Water Works Association - AWWA. **Manual of Water Supply Practices: Water Meters- Selection, Installation, Testing, and Maintenance**. 5ª ed. 2012, 121p.
- BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.
- BROWN, G. O. **Henry Darcy's perfection of the Pitot Tube**. In: Henry P. G. Darcy and Other Pioneers in Hydraulics: Contributions in Celebration of the 200th Birthday of Henry Philibert Gaspard Darcy, ASCE, 2003, 14-23p.
- BUSCARINI, I. *et. al.* **Influencia da calibração de tubos de Pitot Cole na gestão de perdas de água tratada**. In: Congresso Internacional de Metrologia Mecânica, CIMMEC, 3, 2015, Gramado.
- CAMAPUM, F. N. A. **Avaliação de Medidores com Múltiplas Tomadas de Pressão na Macromedição em Sistemas de Água**. 2007. 139 f. Dissertação de Mestrado – Engenharia Civil com ênfase em Recursos hídricos e Tecnologias Ambientais, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.
- CAMURI, R. **Medidor de vazão e de consumo de água por proporcionalidade: haste de inserção em um único**. Saneamento ambiental: desafio para o século 21. ABES, Saneamento ambiental: desafio para o século 21, p. 1-4, João Pessoa, ABES, 2001.

- CHIU, C. **Entropy and Probability Concepts in Hydraulics**. American society of Civil Engineers - Journal of Hydraulic Engineering. Reston, vol. 113 (5), p. 583-600, 1987.
- CHIU, C. et al. **Application of probability and entropy concepts in pipe flow study**. American society of Civil Engineers - Journal of Hydraulic Engineering. Reston, vol. 119 (6), p. 742-756, 1993.
- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. SABESP. **Manual de Pitometria** – São Paulo, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, 1997.
- DINIZ, M. **Avaliação da eficácia de medidores proporcionais de vazão para controle do volume distribuído no sistema de abastecimento de água da cidade de Araguaína - TO**. Palmas: UFT, 2016. 96p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Tocantins, Palmas, 2016.
- DIAS, M. **Uso da "superfórmula" para projeto geométrico de tomada d'água**. São Paulo. 66p. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- DIGITROL. Disponível em: <<http://www.digitrol.com.br/produto-page.php?id=275&uri=tubo-venturi-digitrol>>. Acesso em: 03 de janeiro de 2017.
- DWYER. Disponível em: <www.dwyerinst.com/ApplicationGuides/?ID=44>. Acesso em: 03 de janeiro de 2017.
- FERREIRA, S. **O tubo de pitot e sua utilização**. Revista DAE. São Paulo, 83 edição, 1942. Disponível em: <<http://revistadae.com.br/site/artigo/464-O-tubo-de-Pitot-e-sua-utilizacao>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2016.
- FILARDI, M. **Medição de vazão em tubos de pequeno diâmetro utilizando orifícios integrais**. Ilha solteira: UNESP, 2012. 178p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2012.
- FRANGIPANI, M. **Guias Práticos - Técnicas de Operação em Sistemas de Abastecimento: Macromedicação**. PNCDa - Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água. Brasil: Grau Design, 2007a, v.1, 78p.
- FRANGIPANI, M. **Guias Práticos - Ensaios Pitométricos**. PNCDa - Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água. Brasil: Grau Design, 2007b, v.2, 129p.

HAGER, W. **Hydraulicians in the USA 1800-2000: A biographical dictionary of leaders in hydraulic engineering and fluid mechanics**. CRC PRESS. 1040 p. 2015.

INCONTROL. Disponível em
<http://www.incontrol.ind.br/produtos.php?id=23&id_categoria=6>. Acesso em: 03 de janeiro de 2017.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**. Duque de Caxias, RJ : INMETRO, 2012. 94 p.

International Organization for Standardization: **ISO TR 3313: Measurement of pulsating fluid flow in a pipe by means of orifice plates, nozzles or Venturi tubes**. 2nd ed. 1992.

International Organization for Standardization: **ISO 4006: Measurement of fluid flow in closed conduits - Vocabulary and symbols**. 2nd ed. 1991.

International Organization for Standardization: **ISO 4064/3: Measurement of water flow in closed conduits - Meters for cold potable water - Part 3: Test methods and equipment**. 1st ed. 1983.

Ministério das Cidades. Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água - PNCD. Documento Técnico de Apoio DTA D2: Macromedição. Brasília, 2003.

MARTIM, A. L. **Avaliação do desempenho de um medidor de vazão eletromagnético em situações práticas reais de instalação**. Campinas: UNICAMP, 2005. 199p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MENEGUINI, J. **Projetos de pesquisa no tópico de geração e desprendimento de vórtices no escoamento ao redor de cilindros**. Resenha (livre docente) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MORAES, A.; **Entropia máxima na modelação do fator de atrito (f) de escoamento forçado**. São Paulo. 151p. Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

NADER, G.; JABARDO, P. J. S.; TAIRA, N. M. **Avaliação dos coeficientes de calibração de tubos de Pitot Cole com tips modificados**. Congresso Internacional de Metrologia Mecânica, CIMMEC, 2, 2011, Natal.

- NAUCO. Disponível em: <http://www.nauco.com.br/modelo.php?modelo_id=35>. Acesso em: 03 de janeiro de 2017.
- OLIVEIRA, S. **Análise da influência da presença de veículos de grande porte no comportamento aerodinâmico e aeroelástico de estrutura de ponte.** Campos dos Goytacazes. 120p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2011.
- PEDRAZZI, J. A. **Critérios de projeto para um novo tip do Pitot-Cole.** São Paulo: USP, 1992. 132p. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, São Paulo, 1992.
- SNIS - Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Esgotos.** 2018. Disponível:< <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2016>>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2018.
- SOLE, A. **Instrumentación industrial.** 8ª edição. Marcombo. 2011.
- SPINK, L. K. **Principles and practice of flow meter engineering.** 7th edition. Foxboro Mass. 1967. 575 p.
- TAIRA, N. M. **Treinamento em macromedição, conceitos e termos básicos da medição de vazão de fluidos.** (Apostila IPT – Convênio IPT / Sabesp).São Paulo: IPT, 2003.
- THORTON, J., **Water Loss Control Manual**, 1^a Edição, Nova Iorque, McGraw Hill, 2002.
- UNIVERSITY OF MICHIGAN. Disponível em: <<https://www.lib.umich.edu/faculty-history/faculty/john-airey/bio>>. Acesso em: 09 de janeiro de 2017.
- UPP, E. L.; LANASA, P. J. **Fluid Flow Measurement : A Practical Guide to Accurate Flow Measurement.** 2nd edition. Houston: Gulf Professional Publishing, 2002. 296p.
- VINOD et al. Calibration of an averaging pitot tube by numerical simulations. **Flow Measurement and Instrumentation.** 24, p. 26-28, 2012.

APÊNDICE A - POSIÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO PERIFÉRICAS

Considerando determinar a posição da velocidade média teórica, utilizaram-se as equações da entropia máxima como segue:

$$\frac{\bar{u}}{u_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{M} \cdot \ln \left[1 + (e^M - 1) \left(1 - \frac{\bar{r}^2}{R^2} \right) \right] \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\bar{u}}{u_{m\acute{a}x}} = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} = \frac{Me^M - e^M + 1}{M(e^M - 1)} \quad (\text{A.2})$$

Onde:

M = parâmetro de entropia;

$\bar{r}$ = posição radial do orifício da tomada de pressão periférica;

R = raio do tubo;

$\bar{u}$ = velocidade média;

$u_{m\acute{a}x}$ = velocidade máxima.

Eliminando-se $\left(\frac{\bar{u}}{u_{m\acute{a}x}}\right)$ entre eq. (A.1) e eq. (A.2):

$$\frac{1}{M} \cdot \ln \left[1 + (e^M - 1) \left(1 - \frac{\bar{r}^2}{R^2} \right) \right] = \frac{Me^M - e^M + 1}{M(e^M - 1)} \quad (\text{A.3})$$

Dividindo-se a equação por e^M :

$$\frac{e^{\frac{Me^M - e^M + 1}{e^M - 1} - M} - \frac{1}{e^M}}{1 - \frac{1}{e^M}} = \left(1 - \frac{\bar{r}^2}{R^2} \right) \quad (\text{A.4})$$

Simplificando:

$$\frac{e^{-1 + \frac{M}{e^M - 1} - \frac{1}{e^M}} - \frac{1}{e^M}}{1 - \frac{1}{e^M}} = \left(1 - \frac{\bar{r}^2}{R^2} \right) \quad (\text{A.5})$$

Considerando a função de "M" (F(M)):

$$F(M) = \frac{e^{-1+\frac{M}{e^{M-1}}} - \frac{1}{e^M}}{1 - \frac{1}{e^M}} \quad (\text{A.6})$$

Calculando o limite da F(M) para $M \rightarrow \infty$:

$$\lim_{M \rightarrow \infty} F(M) = e^{-1} \quad (\text{A.7})$$

Substituindo a equação A.7 em A.5:

$$\left(1 - \frac{\bar{r}^2}{R^2}\right) = e^{-1} \quad (\text{A.8})$$

Dessa forma tem-se que:

$$\left(\frac{\bar{r}}{R}\right)^2 = 0,632 \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{\bar{r}}{R} = 0,795 \quad (\text{A.10})$$

Considerando o diâmetro do tubo (D=156mm) a posição da tomada de pressão periférica foi instalada à 62mm do eixo.

APÊNDICE B - "A" EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO DE ENTROPIA (M)

M	a	M	a	M	a	M	a
5,000	0,8023	5,185	0,8090	5,370	0,8153	5,555	0,8212
5,005	0,8025	5,190	0,8092	5,375	0,8154	5,560	0,8213
5,010	0,8027	5,195	0,8093	5,380	0,8156	5,565	0,8215
5,015	0,8029	5,200	0,8095	5,385	0,8158	5,570	0,8216
5,020	0,8031	5,205	0,8097	5,390	0,8159	5,575	0,8218
5,025	0,8032	5,210	0,8099	5,395	0,8161	5,580	0,8220
5,030	0,8034	5,215	0,8100	5,400	0,8163	5,585	0,8221
5,035	0,8036	5,220	0,8102	5,405	0,8164	5,590	0,8223
5,040	0,8038	5,225	0,8104	5,410	0,8166	5,595	0,8224
5,045	0,8040	5,230	0,8106	5,415	0,8167	5,600	0,8226
5,050	0,8042	5,235	0,8107	5,420	0,8169	5,605	0,8227
5,055	0,8043	5,240	0,8109	5,425	0,8171	5,610	0,8229
5,060	0,8045	5,245	0,8111	5,430	0,8172	5,615	0,8230
5,065	0,8047	5,250	0,8112	5,435	0,8174	5,620	0,8232
5,070	0,8049	5,255	0,8114	5,440	0,8176	5,625	0,8233
5,075	0,8051	5,260	0,8116	5,445	0,8177	5,630	0,8235
5,080	0,8053	5,265	0,8118	5,450	0,8179	5,635	0,8236
5,085	0,8054	5,270	0,8119	5,455	0,8180	5,640	0,8238
5,090	0,8056	5,275	0,8121	5,460	0,8182	5,645	0,8239
5,095	0,8058	5,280	0,8123	5,465	0,8184	5,650	0,8241
5,100	0,8060	5,285	0,8124	5,470	0,8185	5,655	0,8242
5,105	0,8062	5,290	0,8126	5,475	0,8187	5,660	0,8244
5,110	0,8063	5,295	0,8128	5,480	0,8188	5,665	0,8245
5,115	0,8065	5,300	0,8129	5,485	0,8190	5,670	0,8247
5,120	0,8067	5,305	0,8131	5,490	0,8191	5,675	0,8248
5,125	0,8069	5,310	0,8133	5,495	0,8193	5,680	0,8250
5,130	0,8071	5,315	0,8134	5,500	0,8195	5,685	0,8251
5,135	0,8072	5,320	0,8136	5,505	0,8196	5,690	0,8253
5,140	0,8074	5,325	0,8138	5,510	0,8198	5,695	0,8254
5,145	0,8076	5,330	0,8139	5,515	0,8199	5,700	0,8256
5,150	0,8078	5,335	0,8141	5,520	0,8201	5,705	0,8257
5,155	0,8079	5,340	0,8143	5,525	0,8202	5,710	0,8259
5,160	0,8081	5,345	0,8144	5,530	0,8204	5,715	0,8260
5,165	0,8083	5,350	0,8146	5,535	0,8206	5,720	0,8262
5,170	0,8085	5,355	0,8148	5,540	0,8207	5,725	0,8263
5,175	0,8086	5,360	0,8149	5,545	0,8209	5,730	0,8265
5,180	0,8088	5,365	0,8151	5,550	0,8210	5,735	0,8266

APÊNDICE C - ESQUEMÁTICO DO PROTÓTIPO

Apresenta-se esquemático ilustrando a configuração do protótipo ensaiado em conduto forçado. Na figura 35, a vista frontal e na figura 36 a vista lateral e corte AA.

Figura 35 - Esquemático frontal.

Figura 36 - Esquemático lateral (esquerda) e corte AA (direita).