

**MAKSOEL AGUSTIN KRAUSPENHAR NIZ**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA  
MEDIÇÃO DE NÍVEIS  
PIEZOMÉTRICOS POR MEIO DA  
TÉCNICA DE BORBULHAMENTO**

**FLORIANÓPOLIS**

**2010**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA MEDIÇÃO DE NÍVEIS  
PIEZOMÉTRICOS POR MEIO DA TÉCNICA DE  
BORBULHAMENTO**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Metrologia

**MAKSOEL AGUSTIN KRAUSPENHAR NIZ**

Florianópolis, Agosto de 2010





# **ANÁLISE DA VIABILIDADE DA MEDIÇÃO DE NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS POR MEIO DA TÉCNICA DE BORBULHAMENTO**

**MAKSOEL AGUSTIN KRAUSPENHAR NIZ**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Metrologia e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Armando Albertazzi Gonçalves Júnior,  
Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

---

Armando Albertazzi Gonçalves Júnior,  
Dr. Eng.  
Orientador

---

Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.  
Presidente

---

Marco Antônio Martins Cavaco, Ph. D.  
Membro

---

Saulo Guths, Dr.  
Membro



*Dedico este trabalho à minha querida avó  
Nelda Lautenschleiger Krauspenhar que em  
sua caminhada muito nos ensinou e nos tem  
ensinado.*

*Muito obrigado por tudo vovó!*



## AGRADECIMENTOS

À minha mãe Iris Krauspenhar e ao meu pai Agustin Emílio Niz Valiente pela educação exemplar, carinho e incentivo que sempre nos deram.

Às minhas irmãs e queridas amigas Leny Camila e Mirian pelo carinho sempre presente.

Ao Professor Armando Albertazzi Gonçalves Júnior pela orientação e apoio.

Ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial - PósMCI da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Ao Laboratório de Metrologia e Automatização - LABMETRO. A todos os Professores integrantes, colaboradores e aos colegas pelos momentos compartilhados.

Ao Professor Wu Feng Chung, à Professora Huei Diana Lee, ao Professor Renato Bobsin Machado, aos amigos Carlos Andrés Ferrero, Willian Zalewski e André Gustavo Maletzke e ao Laboratório de Bioinformática - LABI da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE pela rica convivência e todo o aprendizado.

À Fundação Parque Tecnológico Itaipu - FPTI, ao Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens - CEASB e à Itaipu Binacional pelo apoio para a realização do trabalho.

À Engenheira Silvia Frazão pelo auxílio durante o desenvolvimento do trabalho.

À Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI.

Ao Yesid Asaff Mendonza e ao Laboratório de Hidráulica e Pneumática - LASHIP/UFSC pelo auxílio principalmente nas etapas iniciais de desenvolvimento do trabalho.

À Rosana Vieira pela amizade e constante auxílio.

Aos colegas do PósMCI, especialmente à Turma 2008 (Vladimir, Lúnia, João Gabriel, Francisco, Iara, Benjamin, Willian, Eduardo, Humberto e Arthur).

Ao Eduardo Burin pela rica convivência durante todos esses anos. Amigo de verdade.

À todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.



## RESUMO

# ANÁLISE DA VIABILIDADE DA MEDIÇÃO DE NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS POR MEIO DA TÉCNICA DE BORBULHAMENTO

**Maksoel Agustin Krauspenhar Niz**

Agosto / 2010

Orientador: Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng..

Área de Concentração: Metrologia & Instrumentação.

Palavras-chave: Medição de Nível, Piezômetros, Borbulhamento.

Número de Páginas: 113

A instrumentação de barragens é de fundamental importância para o monitoramento do comportamento dessas estruturas. Por meio da instrumentação pode-se, por exemplo, verificar se a barragem está se comportando conforme planejada e ainda observar antecipadamente mudanças que possam comprometer a sua integridade. Um dos instrumentos mais importantes utilizado nesse contexto corresponde ao piezômetro. Esse instrumento consiste basicamente em um conjunto formado por um elemento poroso denominado bulbo e um tubo de comprimento variável e diâmetro de 19,05 mm (3/4"). Assim, para a leitura da subpressão atuante na fundação da barragem deve-se medir o nível d'água contido no interior do piezômetro, sendo que, atualmente, em muitos casos essa leitura é realizada manualmente, apresentando desvantagens como insalubridade associada aos procedimentos de leitura e susceptibilidade à ocorrência de erros nas medições. Nesse contexto, busca-se desenvolver um instrumento portátil que efetue as medições de nível piezométrico de modo confiável e que melhore as condições de trabalho dos operadores. Este trabalho teve o objetivo de, a partir da análise prévia de diversos princípios de medição de nível, avaliar, principalmente do ponto de vista metrológico, a aplicabilidade do princípio de medição de nível por borbulhamento para a medição de níveis piezométricos. De acordo com as avaliações realizadas neste trabalho, tanto a incerteza de medição estimada teoricamente quanto a incerteza de medição determinada experimentalmente foram inferiores à incerteza de medição considerada aceitável para a aplicação (20 mm). Concluiu-se então que o princípio de medição de nível por borbulhamento representa uma alternativa viável para a medição de níveis piezométricos.





## ABSTRACT

# **EVALUATION OF THE FEASIBILITY OF MEASURING PIEZOMETRIC LEVELS THROUGH BUBBLING TECHNIQUE**

**Maksoel Agustin Krauspenhar Niz**

Ago / 2010

Advisor: Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng..

Area of Concentration: Metology & Instrumentation.

Keywords: Level Measurement, Piezometers, Bubbling.

Number of pages: 113

Dam's instrumentation plays an important role for monitoring the behavior of these structures. Through the analysis of the data generated by the instrumentation it's possible to verify, for example, if the dam is behaving as planned and also observe changes which can damage its integrity beforehand. In this context, one of the most important instrument used is the piezometer. This instrument is basically composed by a porous element called bulb and by a tube of variable length and diameter of 19,05 mm (3/4"). In order to read out the subpressure value in the foundation of the structure the water level contained within the tube is measured. However, in many cases, this process is done manually and has associated disadvantages such as insalubrity for the operators and susceptibility to measurement errors. In this context, is sought the development of a portable instrument which performs reliable measurements of water level in piezometers and improve the working conditions of the operators. From a previous analysis of several level measurement principles, this work was aimed to evaluate, mainly in the metrological point of view, the applicability of bubbling level measurement principle for measuring piezometric levels. According to assessments conducted in this work, both the measurement uncertainties, the theoretically estimated and the experimentally determined were lower than the measurement uncertainty acceptable for the application (20 mm). It was concluded that the bubbling level measurement principle represents a viable alternative for measuring piezometric levels.



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	23
1.1	Contextualização .....	23
1.2	Objetivos .....	28
1.3	Estrutura do trabalho .....	28
2	PIEZOMETRIA .....	31
2.1	Poropressões e subpressões .....	31
2.2	Tipos de piezômetros .....	33
2.2.1	Piezômetros hidráulicos .....	33
2.2.2	Piezômetros pneumáticos .....	34
2.2.3	Piezômetros de resistência elétrica .....	34
2.2.4	Piezômetros de corda vibrante .....	34
2.2.5	Piezômetros de fibra óptica .....	35
2.3	Caracterização dos piezômetros e do comportamento do nível piezométrico em Itaipu .....	36
3	REQUISITOS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO .....	43
3.1	Requisitos metrológicos .....	43
3.2	Requisitos operacionais .....	44
4	TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE NÍVEL .....	45
4.1	Ultrassom .....	45
4.2	Radiofrequência .....	47
4.3	Transmissor de pressão hidrostática .....	49
4.4	Medição de nível por borbulhamento .....	50
4.4.1	Princípio de medição .....	50
4.4.2	Faixa de medição .....	52
4.4.3	Equações .....	53
4.4.3.1	Cálculo da altura de coluna d'água .....	53
4.4.3.2	Correção devido à expulsão da água contida no interior do duto de medição .....	56
4.4.3.3	Indicação do resultado da medição .....	58
5	MATERIAIS E MÉTODOS .....	61
5.1	Considerações iniciais .....	61
5.2	Protótipo do sistema de medição .....	61
5.2.1	Equipamentos .....	61

5.2.2	Calibração da cadeia de medição de pressão . . . . .	66
5.2.3	Sistema computacional de medição . . . . .	66
5.3	Bancada para avaliação em laboratório . . . . .	67
5.3.1	Equipamentos . . . . .	67
5.3.2	Procedimento de ajuste e leitura do nível padrão . . . . .	70
5.4	Métodos de avaliação . . . . .	72
5.4.1	Avaliação teórica da incerteza de medição . . . . .	72
5.4.1.1	Lei de propagação da incerteza . . . . .	72
5.4.1.2	Estimativa das grandezas de entrada . . . . .	74
5.4.2	Avaliação experimental . . . . .	74
5.4.2.1	Avaliação da influência da vazão de ar comprimido . . . . .	74
5.4.2.2	Calibração do sistema de medição . . . . .	76
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	79
6.1	Considerações iniciais . . . . .	79
6.2	Avaliação teórica da incerteza de medição . . . . .	79
6.2.1	Pressão medida pelo transmissor de pressão . . . . .	80
6.2.2	Pressão atmosférica . . . . .	80
6.2.3	Temperatura do ar de medição . . . . .	81
6.2.4	Aceleração da gravidade . . . . .	81
6.2.5	Constante de gás para a mistura . . . . .	81
6.2.6	Temperatura ambiente . . . . .	82
6.2.7	Massa específica da água contida no interior do piezômetro . . . . .	82
6.2.8	Comprimento do duto de medição . . . . .	82
6.2.9	Diâmetro externo do duto de medição . . . . .	83
6.2.10	Diâmetro interno do piezômetro . . . . .	83
6.2.11	Cota da extremidade inferior do duto de medição . . . . .	83
6.2.12	Procedimentos para redução da incerteza de medição . . . . .	85
6.2.12.1	Classe de exatidão do transmissor de pressão . . . . .	85
6.2.12.2	Diâmetro externo do duto de medição . . . . .	86
6.2.12.3	Estimativa da cota da extremidade inferior do duto de medição . . . . .	86
6.2.12.4	Coluna d'água a ser medida . . . . .	86
6.3	Determinação da cota da extremidade inferior do duto de medição . . . . .	87
6.4	Avaliação experimental . . . . .	89
6.4.1	Influência da vazão de ar comprimido . . . . .	90

6.4.2	Calibração do sistema de medição . . . . .	92
6.5	Considerações finais . . . . .	96
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .	97
7.1	Conclusões . . . . .	97
7.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	99
	Apêndice A – Coeficientes de sensibilidade . . . . .	101
	Anexo A – Certificado de calibração do transmissor de pressão . . . . .	103
	Anexo B – Certificado de calibração da escala graduada . . . . .	107



## LISTA DE FIGURAS

1	Representação esquemática dos instrumentos instalados em bloco chave da usina hidrelétrica de Itaipu (CEASB, 2008) . . .	24
2	Representação esquemática de um piezômetro . . . . .	25
3	Equipamento utilizado para leitura do nível piezométrico . . .	26
4	Representação esquemática do elemento sensor . . . . .	26
5	Técnico efetuando a medição de nível piezométrico . . . . .	27
6	Nível freático para casos sem fluxo d'água subterrânea (DUNNICLIFF, 1993) . . . . .	32
7	Representação de nível freático e poropressão (DUNNICLIFF, 1993) . . . . .	33
8	Distribuição dos piezômetros com relação aos seus respectivos comprimentos . . . . .	37
9	Distribuição dos piezômetros instalados na fundação da usina hidrelétrica de Itaipu de acordo com a inclinação em relação a vertical . . . . .	38
10	Exemplo de comportamento histórico do nível d'água no interior de piezômetro . . . . .	39
11	Comportamento do desvio padrão . . . . .	39
12	Intervalo máximo de variação da nível piezométrico no período entre 2004 e 2008 . . . . .	40
13	Distribuição dos piezômetros com relação ao comprimento máximo da região não preenchida . . . . .	41
14	Representação esquemática de sistema de medição de distâncias por meio de ultrassom (WEBSTER, 1999) . . . . .	47
15	Representação esquemática do princípio de medição de nível por borbulhamento . . . . .	51
16	Representação esquemática das principais variáveis envolvidas no instante do borbulhamento . . . . .	54
17	Representação esquemática do acréscimo do nível d'água ocasionado devido à presença do duto de medição e expulsão do líquido contido em seu interior. (a) piezômetro na posição vertical e (b) piezômetro inclinado . . . . .	57
18	Extremidade inferior do duto de medição . . . . .	62
19	Comportamento da vazão de ar comprimido em função da abertura da válvula (FESTO, 2009) . . . . .	65
20	Ilustração da janela de trabalho do sistema computacional desenvolvido . . . . .	68

21	Representação esquemática do equipamentos utilizados juntamente com a bancada: (a) Mangueira PVC transparente, (b) duto de medição, (c) escala graduada, (d) conexão tripla via, (e) transmissor de pressão, (f) placa de madeira, (g) mangueira pneumática, (h) regulador de vazão, (i) conjunto de filtros reguladores de pressão, (j) suprimento de ar comprimido, (l) válvula para ajuste do nível, (m) placa de aquisição de sinais e (n) microcomputador . . . . .	70
22	Imagem da bancada montada em laboratório . . . . .	71
23	Representação da leitura do nível do sistema de medição padrão. Vista frontal (à esquerda) e vista lateral (à direita) . .	72
24	Gráfico de colunas com a contribuição relativa à cada fonte incerteza para o caso mais abrangente considerado neste trabalho . . . . .	85
25	Representação dos tipos de borbulhamento obtidos. Borbulhamento suave (à esquerda), borbulhamento médio (ao centro) e borbulhamento violento (à direita) . . . . .	91
26	Curva de erros para os três tipos de borbulhamento . . . . .	92
27	Curva de erros - calibração (ciclo ascendente) . . . . .	95
28	Curva de erros - calibração (ciclo descendente) . . . . .	95



## LISTA DE TABELAS

1	Características do duto de medição . . . . .	62
2	Características do transmissor de pressão . . . . .	62
3	Características da placa de aquisição de sinais . . . . .	63
4	Características do filtro regulador de pressão A . . . . .	64
5	Características do filtro regulador de pressão B . . . . .	64
6	Características do regulador de vazão . . . . .	64
7	Características da conexão pneumática em T . . . . .	65
8	Balanço de incertezas para a medição de nível por borbulha- mento . . . . .	84
9	Resultados das medições com o três tipos de borbulhamento	91
10	Resultado da calibração . . . . .	93
11	Balanço de incertezas para o ponto 0,501 <i>m</i> do ciclo ascendente	94



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A segurança das barragens constitui uma preocupação permanente para as entidades governamentais, tanto pela importância econômica dessas estruturas, como pelo risco potencial que a possibilidade de sua ruptura representa em termos de vidas humanas, impacto ao meio ambiente, prejuízos materiais e reflexos econômico-financeiros (MEDEIROS, 2003).

Somente no Brasil existem entre 6000 a 8000 barragens, das quais aproximadamente 1000 podem ser consideradas como grandes barragens (CEASB, 2008). Existem diversos registros de acidentes e incidentes envolvendo estruturas dessa natureza, como por exemplo, na história recente brasileira, o rompimento da barragem de Algodões I, em 2009, no município de Cocal-PI, que ocasionou o óbito de oito pessoas (FOLHA ONLINE, 2009).

Nesse contexto, a instrumentação de barragens se apresenta com fundamental importância, sendo já utilizada desde a década de 50. A partir de então tem se notado um contínuo avanço nos instrumentos e nos métodos utilizados para o monitoramento de barragens (SILVEIRA, 2006). Por meio da instrumentação pode-se, por exemplo, verificar se a barragem está se comportando conforme planejada e ainda observar antecipadamente mudanças que possam comprometer a sua integridade. Assim, a instrumentação possui papel importante na construção, no enchimento e durante todo o período de operação das barragens (CBGB, 1996). Dentre os parâmetros frequentemente monitorados destacam-se os deslocamentos horizontais, recalques, tensões e deformações nos elementos estruturais, temperaturas, vazões de drenagem e subpressões nas fundações das estruturas e em discontinuidades nas fundações (SILVEIRA, 2006):

Como exemplo, a Figura 1 ilustra os principais instrumentos existentes em um “bloco chave<sup>1</sup>” da usina hidrelétrica de Itaipu (CEASB, 2008).

---

<sup>1</sup>Bloco que contém grande quantidade de instrumentos instalados.

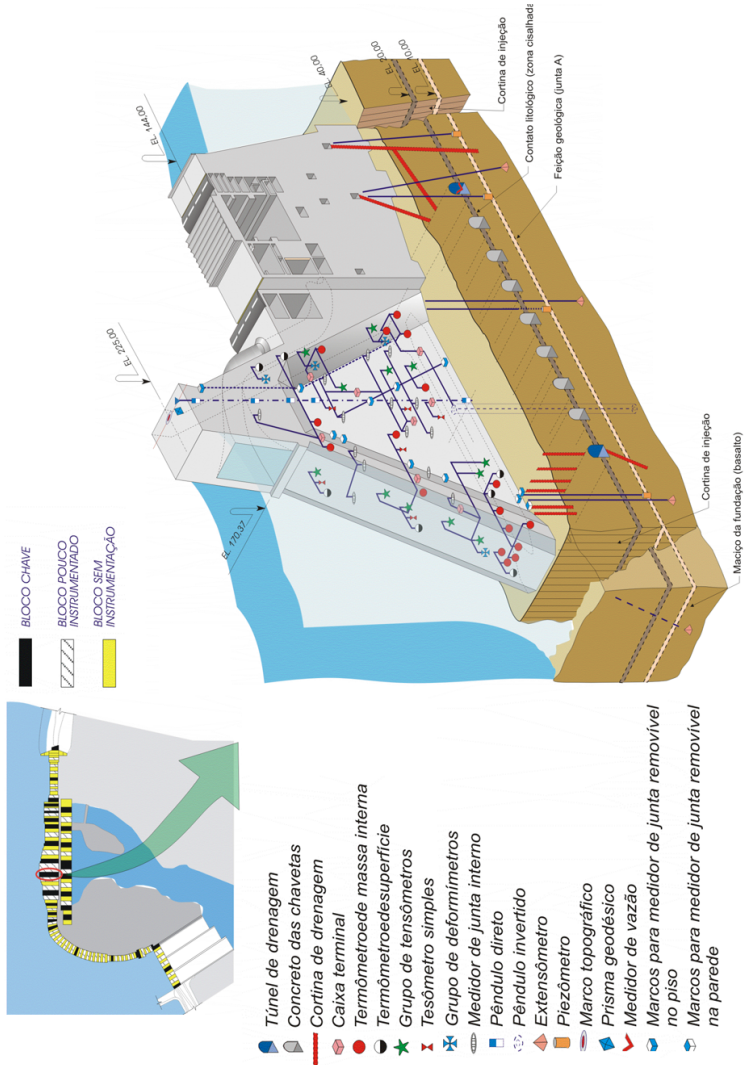


Figura 1: Representação esquemática dos instrumentos instalados em bloco chave da usina hidrelétrica de Itaipu (CEASB, 2008)

Nesse contexto, um dos principais instrumentos utilizados no monitoramento de barragens consiste no piezômetro. Na usina hidrelétrica de Itaipu, por exemplo, existem mais de 590 instrumentos dessa categoria, que juntos representam aproximadamente 25% de todos os instrumentos existentes na barragem. Cada piezômetro consiste basicamente em um conjunto formado por um elemento poroso denominado bulbo e um tubo de PVC (Cloreto de polivinila) com diâmetro de 3/4" e comprimento variável, conforme apresentado na Figura 2.

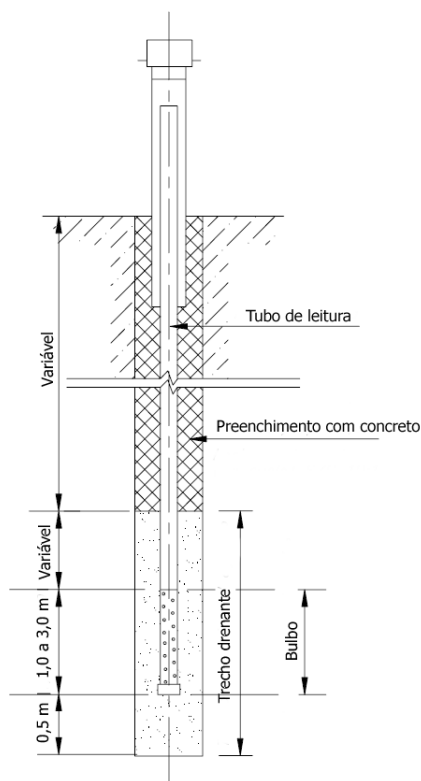


Figura 2: Representação esquemática de um piezômetro

Esse conjunto permanece posicionado em um furo de sondagem realizado da superfície onde será efetuada a leitura até o local a ser monitorado. A função desse instrumento é mensurar a pressão hidráulica em determinados

locais da fundação, sendo o seu funcionamento fundamentado no princípio de vasos comunicantes, considerando-se que a pressão hidráulica externa atuante na região do bulbo será igualada à pressão exercida pela coluna d'água presente no interior do tubo de PVC.

Em grande parte das usinas hidrelétricas e barragens em geral a leitura desses piezômetros, chamados também de piezômetros *standpipe* ou piezômetros de tubo aberto, é realizada manualmente, através de um cabo coaxial, graduado de metro em metro, possuindo na extremidade um sensor constituído por dois eletrodos dispostos concentricamente e isolados eletricamente entre si (Figuras 3 e 4).



Figura 3: Equipamento utilizado para leitura do nível piezométrico

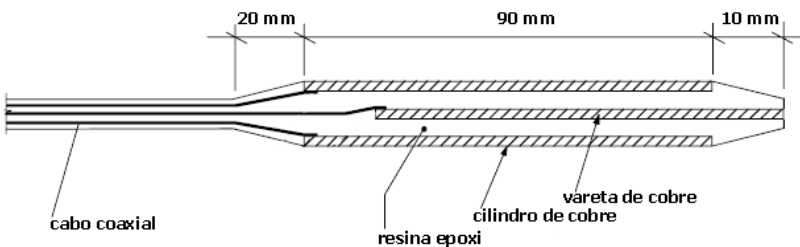


Figura 4: Representação esquemática do elemento sensor

Assim, no instante em que o sensor atinge o nível d'água, a água fecha o circuito elétrico formado pelo conjunto sensor/cabo/indicador/bateria. O indicador do contato entre o sensor e o nível d'água pode ser representado por um galvanômetro ou ainda por um sinalizador sonoro (chamado também de “pio elétrico”). Desse modo, para a realização da medição do nível piezométrico, esse conjunto é introduzido continuamente no piezômetro até o instante em que o sensor entre em contato com a superfície d'água. A leitura, referida à extremidade superior ou “boca” do piezômetro, é então obtida com auxílio de uma trena com resolução de 1 centímetro. O técnico responsável pela leitura mede o comprimento da coluna de ar, entre a “boca” do piezômetro e a superfície d'água no interior do piezômetro e anota o valor da leitura na planilha correspondente<sup>2</sup>. Posteriormente esses dados são transcritos para a base de dados correspondente para assim serem efetuadas as análises (ITAIPU, 2004)

A Figura 5 apresenta uma ilustração de técnico leiturista efetuando a medição.



Figura 5: Técnico efetuando a medição de nível piezométrico

Entretanto, a medição por meio desse método, utilizando-se o cabo graduado com o sensor “pio elétrico” na extremidade, apresenta algumas vantagens, dentre as quais:

---

<sup>2</sup>Como as cotas nas quais foram instalados os bulbos e as cotas das “bocas” dos piezômetros foram anteriormente medidas, por meio da medição da altura da coluna de ar existente no tubo de leitura, pode-se determinar a cota do nível d'água no interior do piezômetro.

- insalubridade associada à utilização do equipamento, uma vez que essas medições são realizadas frequentemente e existem piezômetros que apresentam extensas profundidades;
- procedimento de medição demorado, agravado pela grande quantidade de piezômetros existentes;
- necessidade freqüente de ajustes no cabo;
- susceptibilidade a erros na medição e na transcrição dos dados para as planilhas.

Nesse contexto, diante das desvantagens relacionadas a esse procedimento de medição, busca-se uma alternativa que melhore as condições trabalho dos operadores e a confiabilidade das medições.

## 1.2 Objetivos

Objetivo geral:

a) melhorar a condição de trabalho dos operadores e a confiabilidade das medições de piezômetros do tipo *standpipe*;

Objetivos específicos:

a) avaliar a técnica de medição de nível por borbulhamento visando aplicação na medição de níveis piezométricos;

b) desenvolver e validar experimentalmente um protótipo de sistema de medição capaz de medir níveis piezométricos com base no método proposto.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi organizado da seguinte maneira:

No Capítulo 2 é realizado um estudo à respeito da piezometria e os principais tipos de piezômetros são apresentados. Adicionalmente é também realizado um estudo a respeito das características dos piezômetros e do comportamento histórico dos níveis piezométricos para o caso dos instrumentos instalados na barragem da usina hidrelétrica de Itaipu.

No Capítulo 3 os principais requisitos, metrológicos e operacionais, da solução a ser gerada são apresentados.

No Capítulo 4 são apresentadas algumas técnicas avaliadas visando a medição de níveis piezométricos. Ainda, devido a sua utilização neste traba-



lho, a técnica de medição de nível por borbulhamento é apresentada de modo mais detalhado.

No Capítulo 5 são apresentados os materiais e os métodos utilizados para a avaliação do princípio de medição proposto para a medição de níveis piezométricos. Primeiramente são apresentados os equipamentos utilizados para a confecção do protótipo e da bancada de avaliação e, posteriormente, os métodos de avaliação.

Os resultados e as discussões das análises realizadas neste trabalho estão apresentadas no Capítulo 6 e, no Capítulo 7 as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

No Apêndice A são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo dos coeficientes de sensibilidade e nos Anexos A e B os certificados de calibração, respectivamente, da cadeia de medição de pressão e da escala graduada utilizados neste trabalho.



## 2 PIEZOMETRIA

O nível d'água no interior de um piezômetro está relacionado com o valor da poropressão ou subpressão atuante no local onde o bulbo está instalado. Nesse contexto, este capítulo apresenta as definições conceituais dessas grandezas e também uma breve descrição dos principais tipos de piezômetros existentes. Ao final do capítulo é apresentado um estudo de caso, considerando-se as características e os dados do comportamento histórico da elevação piezométrica dos piezômetros existentes na barragem da usina hidrelétrica de Itaipu.

### 2.1 Poropressões e subpressões

Conforme apresentado no capítulo anterior, os piezômetros têm como finalidade quantificar os valores de poropressões e subpressões atuantes no aterro e na fundação de barragens, respectivamente. A medição e o acompanhamento do comportamento das poropressões e subpressões auxiliam significativamente, por exemplo: na avaliação dos fatores de segurança e condições de estabilidade durante toda a operação ou esvaziamento rápido da barragem; alertando sobre a necessidade de execução ou suplementação de poços de alívio para a desopressão de determinadas áreas; no estudo do comportamento das infiltrações no interior das fundações e como indicativo de desempenho dos dispositivos de vedação (SILVEIRA, 2003).

Nesse contexto, para definir poropressão e subpressão, primeiramente será apresentado o conceito de nível freático. O nível freático é definido como a superfície superior de um corpo d'água subterrâneo, na qual a pressão corresponde à atmosférica. A Figura 6 auxilia a explicar esse conceito. Na ilustração os três tubos perfurados estão inseridos em um solo no qual não ocorre fluxo d'água. Devido ao fato do valor da pressão hidrostática aumentar linearmente com a profundidade, independentemente na posição da região perfurada, na condição de equilíbrio, o nível do líquido se elevará até atingir o nível freático (DUNNICLIFF, 1993).

Por outro lado, na Figura 7 é apresentada uma situação decorrente ao aterramento realizado sobre uma camada de areia, imediatamente após sua execução. Nessa situação, a consolidação do terreno ainda não está terminada, o que gera uma elevação na poropressão na camada de argila e faz com que o nível freático também não se encontre em equilíbrio (DUNNICLIFF, 1993). O tubo (B) é perfurado em toda a sua extensão e os outros são perfurados apenas no trecho inferior. Nos tubos (A) e (B), devido à alta perme-

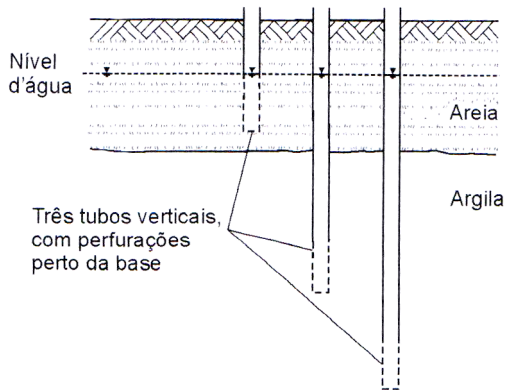


Figura 6: Nível freático para casos sem fluxo d'água subterrânea (DUNNICLIFF, 1993)

abilidade da areia, o acréscimo da poropressão é rapidamente dissipado e os mesmos passam a indicar o nível freático. Por outro lado, os tubos (C) e (D) indicam as poropressões na camada de argila nos locais (1) e (2), respectivamente. O nível d'água no tubo (C) é menor do que no tubo (D) devido à maior proximidade da região perfurada do tubo (C) com relação à camada superior de areia. Conseqüentemente, o local onde a região perfurada do duto (C) foi posicionado apresenta maior permeabilidade.

O tubo (B) indica o nível freático e é então chamado de *poço de observação* ou *medidor de nível d'água*. Os tubos (C) e (D) indicam as poropressões e suas dissipações e são designados *piezômetros* (SILVEIRA, 2003). Assim, quanto maior o nível d'água no interior do tubo, maior a poropressão no local de instalação da região perfurada.

Contudo, uma distinção é realizada para diferenciar as poropressões medidas no aterro da barragem das medidas na fundação. Poropressões propriamente ditas correspondem àquelas medidas no aterro enquanto as poropressões medidas na fundação são denominadas subpressões. Assim, a mensuração das subpressões atuantes em fundações são de grande importância para análise da estabilidade da estrutura da barragem e deve ser realizada em distintos locais da fundação, como por exemplo no contato solo-rocha ou saprolito-rocha, nas camadas mais permeáveis da fundação e nas proximidades da base da barragem (SILVEIRA, 2003).

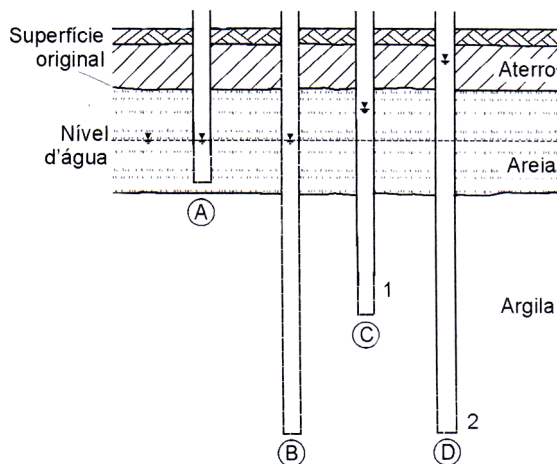


Figura 7: Representação de nível freático e poropressão (DUNNICLIFF, 1993)

## 2.2 Tipos de piezômetros

O piezômetro *standpipe*, apresentado no Capítulo 1, corresponde a um dos instrumentos mais confiáveis e robustos para a quantificação de subpressões e poropressões. Dentre as principais características que contribuíram para o sucesso desse instrumento destacam-se a sua simplicidade, o baixo custo, a confiabilidade e o desempenho a longo prazo (compatível com a vida útil da barragem).

Entretanto, existem também outros tipos de instrumentos que podem ser utilizados para a mesma finalidade. A seguir, alguns desses instrumentos são apresentados de modo simplificado.

### 2.2.1 Piezômetros hidráulicos

O piezômetro hidráulico é constituído basicamente por um elemento poroso que é conectado à cabine de leitura através de duas tubulações de plástico. Ambas as tubulações são preenchidas por líquido e assim, um manômetro localizado na cabine de leitura indica a pressão média atuante no elemento poroso. A cota piezométrica é então obtida a partir da soma entre a pressão indicada pelo manômetro e a cota de instalação do mesmo, determinada por topografia. Contudo, nas barragens onde esses instrumentos

foram instalados, observou-se que uma quantidade considerável dos mesmos apresentaram comportamento insatisfatório e ainda destaca-se que a vida útil desses piezômetros (aproximadamente 20 anos) seria insuficiente em grande parte das situações pois a vida útil de uma barragem é de aproximadamente 50 anos e uma vez danificados, dificilmente esses instrumentos poderiam ser recuperados ou substituídos (SILVEIRA, 2006).

### **2.2.2 *Piezômetros pneumáticos***

Na fase inicial de instrumentação de barragens foram utilizados distintos tipos de piezômetros que operavam com sistemas pneumáticos. O funcionamento desses instrumentos consiste basicamente na aplicação de uma pressão crescente na tubulação de alimentação e na medição da pressão na tubulação de retorno. No instante em que essas duas pressões se igualam, a pressão medida corresponde à pressão atuante na membrana que é sensível à pressão exercida pelo solo. A vida útil aproximada desses piezômetros é semelhante à dos piezômetros hidráulicos e como fator negativo, também destaca-se o demorado tempo necessário para a realização das leituras podendo chegar a 20 minutos em alguns piezômetros (SILVEIRA, 2006).

### **2.2.3 *Piezômetros de resistência elétrica***

Esses instrumentos têm o funcionamento fundamentado em uma ponte de Wheatstone. As alterações da pressão intersticial do solo são transmitidas mecanicamente a uma resistência elétrica que, em decorrência à variação de pressão, sofre uma variação equivalente no valor de sua resistência. Essa variação de resistência gera uma tensão de saída que é proporcional à pressão atuante no local onde o transdutor está posicionado. Geralmente esses instrumentos são inseridos em furos de sondagem ou ainda utilizados para a automatização de piezômetros do tipo *standpipe*.

Uma característica importante desses instrumentos corresponde à possibilidade da realização de medições dinâmicas pois os dados podem ser registrados continuamente. Dentre as desvantagens destacam-se a necessidade da instalação de um transdutor para cada local a ser monitorado e a necessidade de calibrações periódicas dos mesmos (SILVEIRA, 2006).

### **2.2.4 *Piezômetros de corda vibrante***

Devido a sua alta sensibilidade, diversos fabricantes vem utilizando o princípio da corda vibrante para a confecção de seus instrumentos. De um

modo genérico, esses instrumentos possuem um fio estirado em seu interior que é acoplado ao centro de um diafragma de tal forma que um deslocamento do diafragma gera uma mudança no estado de tensão do fio. Assim, por meio de calibração adequada pode-se determinar o valor da poropressão (LIGOCKI, 2003).

De modo semelhante aos piezômetros de resistência elétrica esses instrumentos podem ser fixados diretamente ao fundo de furos de sondagem ou ainda utilizados para a automatização de piezômetros do tipo *standpipe*. No entanto, a utilização desses instrumentos implica também na necessidade de uma unidade para cada terminal de leitura.

De acordo com a literatura, pôde-se observar que esses instrumentos apresentam em geral vida útil na ordem de 20 a 30 anos, principalmente, em decorrência ao desgaste dos componentes eletrônicos e do pequeno fio metálico que funciona como corda vibrante. Considerando-se toda a vida útil da barragem (aproximadamente 50 anos) esses instrumentos ainda não apresentam durabilidade e confiabilidade adequadas. Todavia, esses instrumentos, juntamente com os piezômetros elétricos, podem apresentar falhas em decorrência a proximidade com campos magnéticos provenientes, por exemplo, de linhas de transmissão ou de unidades geradoras (SILVEIRA, 2006).

### ***2.2.5 Piezômetros de fibra óptica***

Os sensores de fibra óptica representam um dos mais recentes desenvolvimentos na instrumentação geotécnica e estrutural. As medições fundamentadas na utilização de fibra óptica são realizadas por meio de diferentes princípios, tais como a interferometria de Fabry-Perot, a grade de Bragg e o polarímetro (VALENTE et al., 2002). As principais vantagens desses instrumentos são as suas dimensões reduzidas, o rápido tempo de resposta e a imunidade à descargas atmosféricas, ondas de rádiofrequência ou interferências eletromagnéticas (SILVEIRA, 2006). A utilização futura de instrumentos que utilizam fibra óptica é considerada promissora, contudo ainda são necessários estudos que comprovem a sua durabilidade a longo prazo sob condições reais de obras de engenharia geotécnica (SILVEIRA, 2006).

### **2.3 Caracterização dos piezômetros e do comportamento do nível piezométrico em Itaipu**

Com o objetivo de auxiliar no dimensionamento e especificação do sistema de medição a ser desenvolvido, foi realizado um estudo de caso considerando-se os dados registrados no período de aproximadamente 28 anos à partir da instalação e primeiras leituras, em 1980, dos piezômetros localizados na fundação da barragem da usina hidrelétrica de Itaipu.

Na barragem da usina hidrelétrica de Itaipu existem aproximadamente 590 piezômetros instalados, dos quais praticamente 500 são medidos de modo manual por meio da utilização do conjunto composto pelo cabo graduado e sensor elétrico (Figura 3, apresentada no Capítulo 1). Os demais piezômetros são medidos por meio de manômetros posicionados na extremidade superior do duto de medição, tendo-se em vista que nesses casos ocorreu artesianismo, ou seja, o nível da água excedeu o comprimento do duto. A frequência de leitura desses instrumentos depende principalmente do local no qual os mesmos estão instalados, podendo ser realizados, no caso da usina de Itaipu, semanal ou quinzenalmente.

Desse modo, considerando-se as informações relativas ao posicionamento dos piezômetros e os dados das medições realizadas no período entre 1980 e 2008, dos piezômetros que não apresentam artesianismo, foram realizadas as seguintes análises.

#### ***Comprimento dos piezômetros***

O comprimento de cada piezômetro corresponde à diferença entre a cota da sua extremidade superior (boca do piezômetro) e a cota da extremidade inferior (fundo do bulbo). A Figura 8 apresenta a distribuição dos piezômetros instalados na barragem da usina hidrelétrica de Itaipu, com relação ao comprimento dos mesmos<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>A inclinação de cada piezômetro foi também considerada para o cálculo de seu comprimento



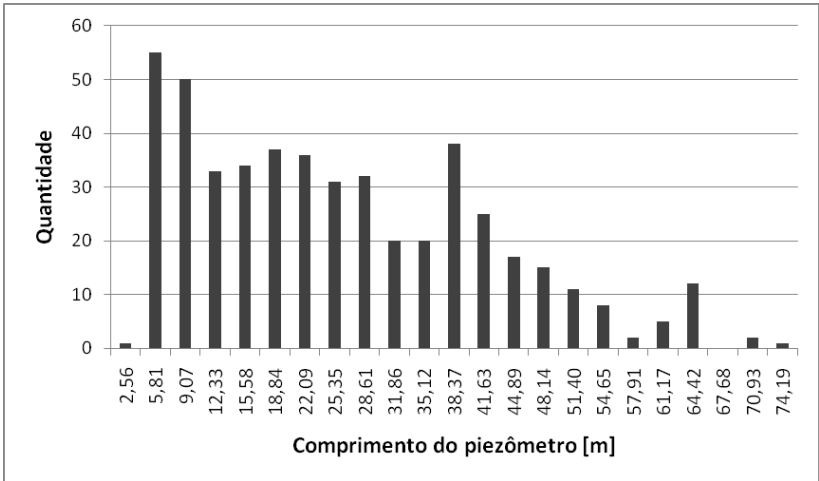


Figura 8: Distribuição dos piezômetros com relação aos seus respectivos comprimentos

### *Inclinação dos piezômetros*

Alguns dos piezômetros existentes na barragem da usina hidrelétrica de Itaipu foram instalados inclinados em relação a vertical. A Figura 9 apresenta a distribuição dos piezômetros em função de suas respectivas inclinações. Pode-se observar que a grande maioria desses instrumentos foram instalados verticalmente ou com inclinação de  $10^\circ$ .

### *Comportamento do nível d'água no interior do piezômetro*

O comportamento do nível é variável, de piezômetro para piezômetro, dependendo principalmente do local de instalação do bulbo na fundação da barragem. Como exemplo, a Figura 10 apresenta o comportamento histórico da cota do nível d'água no interior de um piezômetro, desde a instalação do instrumento, no ano de 1980, até o ano de 2008.

Um fato importante que pode ser observado na Figura 10, e que ocorre em grande parte dos piezômetros existentes na usina de Itaipu, corresponde à diminuição da variabilidade do nível com o transcorrer do tempo. Na Figura 11 é apresentado um histograma contendo a quantidade de instrumentos que apresentaram distintos valores de desvio-padrão do nível piezométrico, para três períodos distintos: considerando-se todo o histórico das medições (1980

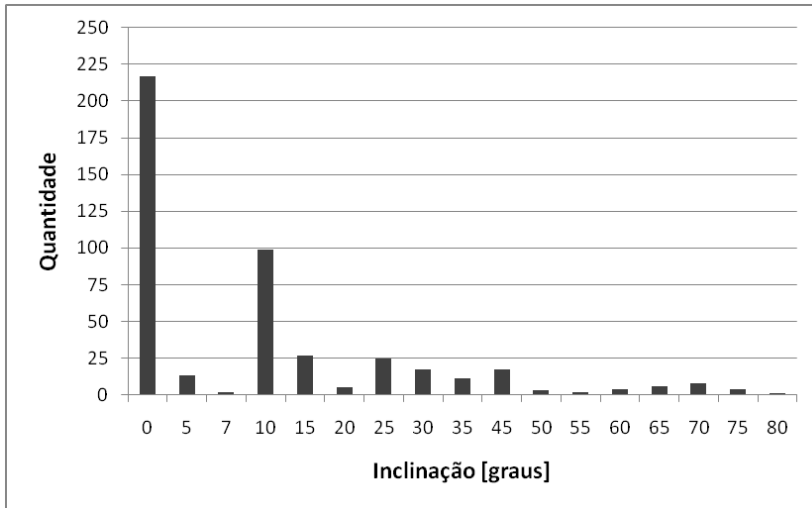


Figura 9: Distribuição dos piezômetros instalados na fundação da usina hidrelétrica de Itaipu de acordo com a inclinação em relação a vertical

- 2008), considerando-se os últimos 10 anos das medições (1998 - 2008) e considerando-se os últimos 5 anos (2004-2008).

Podem ser observados que com o passar do tempo ocorreu um acréscimo na quantidade de piezômetros que apresentam valores menores de desvio padrão. Considerando-se todo o histórico das medições, por exemplo, observa-se que apenas 20% dos piezômetros apresentam desvio padrão de até 0,5 metros. Por outro lado, considerando-se os períodos mais recentes, entre (1998 e 2008) e (2004 e 2008) observa-se que a quantidade relativa de piezômetros que apresentaram o mesmo intervalo de desvio-padrão corresponde à 69% e 82% respectivamente.

Na Figura 12, também relacionada com a variabilidade do comportamento do nível d'água no interior do piezômetro, é apresentada a distribuição dos piezômetros com relação ao intervalo máximo da variação do nível piezométrico, ou seja, o resultado da subtração entre o valor máximo e o valor mínimo registrados no período de cinco anos considerado.

Outro fator que deve ser considerado corresponde à existência de piezômetros secos. Mesmo estando nessas condições, as leituras desses instrumentos continuam sendo realizadas periodicamente. Na usina hi-

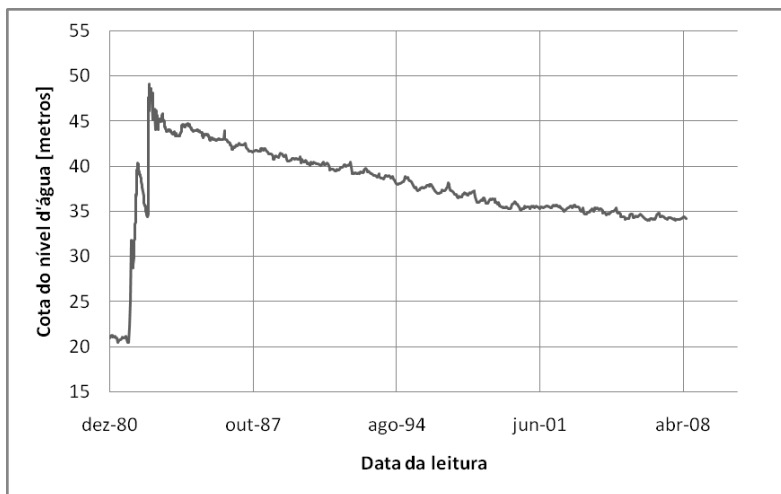


Figura 10: Exemplo de comportamento histórico do nível d'água no interior de piezômetro

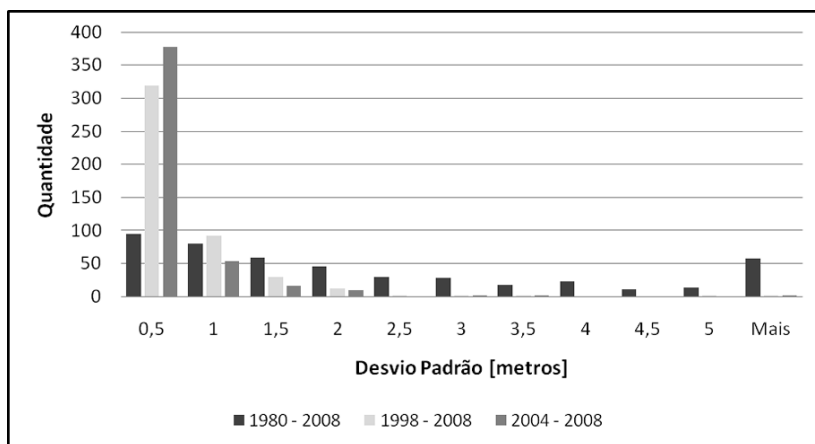


Figura 11: Comportamento do desvio padrão

drelétrica de Itaipu existem, atualmente, aproximadamente 40 piezômetros nessa situação.

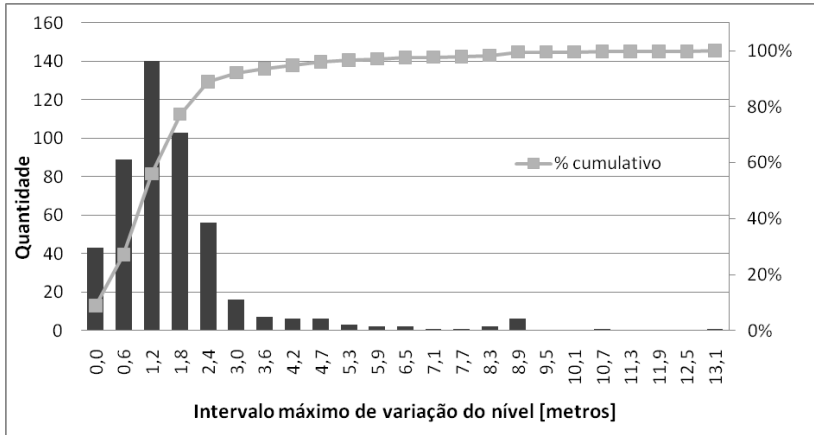


Figura 12: Intervalo máximo de variação da nível piezométrico no período entre 2004 e 2008

### ***Comprimento da região não preenchida***

Dependendo do princípio de medição utilizado, a medição da cota piezométrica pode ser realizada indiretamente à partir da medição do comprimento da região não preenchida. Nesse contexto, na Figura 13 é apresentado um histograma que apresenta a distribuição dos piezômetros com relação ao valor máximo do comprimento da região não preenchida<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Valor correspondente à distância entre a extremidade superior piezômetro (cota da boca) e a cota mínima do nível d'água em seu interior, considerando-se o intervalo de tempo entre os anos de 2004 e 2008.

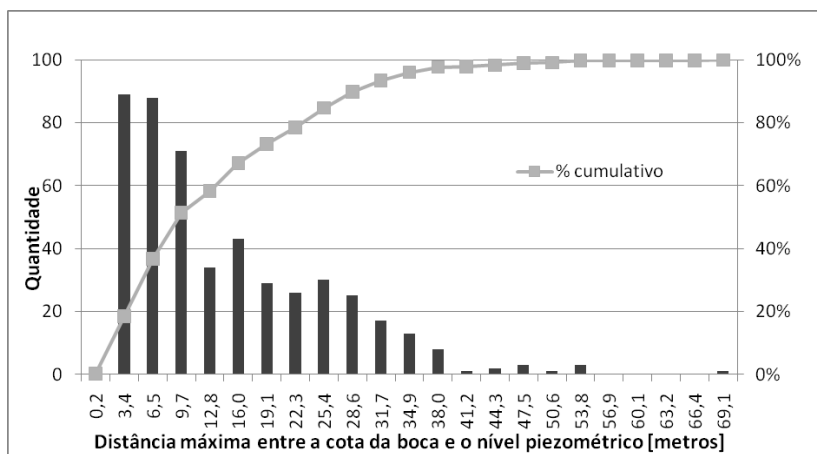


Figura 13: Distribuição dos piezômetros com relação ao comprimento máximo da região não preenchida



### 3 REQUISITOS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

A partir da caracterização das dimensões dos piezômetros e do comportamento do nível piezométrico em Itaipu, juntamente com reuniões realizadas com especialistas em instrumentação, foram definidos os principais requisitos metrológicos e operacionais do sistema de medição a ser desenvolvido.

Neste capítulo esses requisitos são apresentados. Caso o sistema de medição avaliado seja adequado do ponto de vista metrológico, em etapas posteriores, o sistema de medição deverá ser adaptado de modo a atender os requisitos operacionais.

#### 3.1 Requisitos metrológicos

- Faixa de medição: O resultado da medição deverá indicar a cota do nível d'água no interior do piezômetro e essa cota deverá estar referenciada em relação à cota da boca (ou à cota da extremidade inferior) do piezômetro correspondente. Assim sendo, a faixa de medição do sistema a ser desenvolvido dependerá da grandeza a ser medida para a determinação da cota do nível d'água. Caso seja medida a altura não preenchida no interior do piezômetro, ou seja, distância entre a boca do piezômetro e a superfície d'água, a faixa de medição necessária, considerando-se os dados de Itaipu, seria de aproximadamente 0 a 70 metros. Caso a grandeza a ser medida corresponda à altura de coluna d'água a partir da extremidade inferior do piezômetro, a faixa de medição necessária, considerando-se novamente os dados de Itaipu, seria de aproximadamente 0 a 75 metros. Entretanto, caso seja medida a altura da coluna d'água a partir de uma altura intermediária, considerando-se cada piezômetro de modo independente, a altura de coluna d'água a ser medida poderá ser reduzida e adequada de acordo com o comportamento do nível d'água em seu interior. Assim, a partir dos dados de Itaipu, a faixa de medição necessária considerando-se o maior intervalo de variação no período de cinco anos, seria de aproximadamente 13 metros.
- Incerteza de medição: é considerada aceitável uma incerteza de medição máxima de 20 milímetros. Esse valor foi definido em comum acordo com especialistas em instrumentação de barragens de Itaipu por ser compatível com as demandas e faixas de operação típicas para

as medições de níveis piezométricos.

- **Resolução:** a resolução do sistema de medição deve ser adequada para registrar pequenas variações significativas do mensurando e não deve ser grosseira de modo a comprometer a incerteza de medição. Assim, uma resolução de 1 ou 2 milímetros é considerada adequada.
- **Velocidade de medição:** o tempo máximo considerado aceitável para a realização de uma medição corresponde a aproximadamente cinco minutos, valor esse também determinado após realização de reuniões com especialistas da área.
- **Procedimento de calibração:** um procedimento de calibração deverá ser especificado com o objetivo de possibilitar a verificação e a manutenção das características metroológicas do sistema de medição.

### 3.2 Requisitos operacionais

- **Portabilidade:** O sistema de medição deverá ser portátil de modo a permitir seu transporte nas galerias entre os terminais de leitura existentes.
- **Grau de automação:** o instrumento deverá realizar as medições “*in situ*” de modo a não inibir a realização de inspeções visuais que são realizadas pelo técnico leitorista durante o seu percurso entre os terminais de leitura.
- **Resistência mecânica:** tendo-se em vista que o instrumento será transportado em todo interior da usina, o mesmo deverá ser resistente a quedas e eventuais impactos que possam ocorrer no manuseio.
- **Condições de medição:** a solução gerada deverá estar apta para operar em locais com grande variabilidade de temperatura e umidade. A temperatura nas galerias onde os piezômetros estão instalados não é monitorada, contudo, sabe-se que em função do posicionamento do piezômetro, a amplitude da variação da temperatura ambiente considerando-se diferentes terminais de medição pode chegar a 20°C, em virtude da existência de piezômetros localizados próximos às unidades geradoras. Pelo mesmo motivo, a umidade relativa do ar nesses locais apresenta grande variabilidade. Além desses fatos, a solução gerada deverá também ser capaz de efetuar medições em piezômetros que encontram-se inclinados em relação à vertical.



## 4 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE NÍVEL

O nível de determinada substância (líquida ou sólida) pode ser definido como a sua altura relativa a um plano de referência como, por exemplo, o fundo de um tanque ou reservatório. A medição de nível corresponde a um procedimento frequentemente utilizado na indústria em diversas áreas tais como química, petroquímica, farmacêutica e alimentícia. Medições dessa natureza são também realizadas em tanques móveis em caminhões ou navios, assim como em reservatórios naturais como lagos, represas e oceanos (WEBSTER, 1999).

Assim, diante das diversas aplicações, existe também uma grande variedade de princípios de medição que podem ser utilizados com o objetivo de quantificar o nível de determinada substância. Essas medições podem ser efetuadas medindo-se diretamente o nível contido no reservatório (*innage*) ou medindo-se o espaço vazio (*ullage*) e determinando-se assim o nível de modo indireto.

Dentre as variáveis que devem ser consideradas para a seleção de um princípio de medição pode-se citar: a grandeza de interesse (altura, volume, peso ou interface), as características físicas e dimensionais do reservatório, as propriedades físicas e químicas da substância cujo nível será medido, as características técnicas do princípio de medição a ser utilizado e a exigência metrológica requerida.

Nesse contexto, no presente capítulo é apresentada uma breve descrição de alguns dos princípios de medição estudados visando a medição de níveis piezométricos<sup>1</sup>. No final do capítulo a técnica de medição de nível por borbulhamento, avaliada neste trabalho, é descrita de modo mais abrangente.

### 4.1 Ultrassom

O ouvido humano sadio é capaz de identificar ondas sonoras que apresentam frequências na faixa entre 20 Hz e 20 kHz aproximadamente. Ondas sonoras que apresentam frequências inferiores a 20 Hz são denominadas infrassons e as que apresentam frequências acima de 20 kHz são conhecidas como ultrassons (CHEEKE, 2002). O ultrassom é frequentemente utilizado em aplicações de diversas áreas como química, física, engenharias, biolo-

---

<sup>1</sup>Empresas especializadas em medição de nível foram consultadas e não foram encontrados equipamentos que possibilitassem a medição de níveis piezométricos de modo distinto ao utilizado atualmente.

gia, medicina e oceanografia. Exemplos da utilização de ondas acústicas com frequências ultrasônicas envolvem a inspeções de defeitos como trincas e corrosão em materiais ou peças (BRAGA et al., 2002), verificação das propriedades físicas e químicas de estruturas (FONSECA, 2005) e realização de exames e diagnósticos na medicina e medicina veterinária (TAVEIROS et al., 2008).

O princípio que rege a utilização de ondas ultrasônicas baseia-se na emissão de um pulso ultrasônico, que ao atingir determinado objeto, terá uma fração refletida (eco), e cujas características possibilitam a determinação de atributos do objeto em questão como a sua localização, tamanho, velocidade e textura (WEBSTER, 1999). Para o caso da medição de distâncias, mede-se o intervalo de tempo transcorrido entre a emissão e a recepção do pulso ultrasônico e calcula-se a distância até o anteparo em função da velocidade do ultrassom no meio, conforme a Equação 4.1. Assim, o cota piezométrica seria estimada indiretamente a partir da medição da altura não preenchida.

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (4.1)$$

Onde  $d$  corresponde à distância entre o elemento emissor/receptor e o objeto,  $t$  ao intervalo de tempo entre a emissão e a recepção do pulso e  $c$  corresponde a velocidade de propagação do ultrassom no meio (Equação 4.2).

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot R \cdot T}{M}} \quad (4.2)$$

Onde  $g$  corresponde à razão entre o calor específico a pressão constante ( $c_p$ ) e calor específico a volume constante ( $c_v$ ) do ar ou gás em questão. O termo  $R$  à constante universal dos gases,  $T$  à temperatura absoluta e  $M$  ao peso molecular.

Na Figura 14 é apresentada uma representação esquemática dos componentes necessários para medição de distâncias por ultrassom.

O oscilador gera um sinal elétrico com a frequência desejada. No transmissor, esse sinal elétrico é convertido em vibração mecânica na mesma frequência. Por sua vez, essa vibração mecânica gera ondas ultrasônicas, as quais são total ou parcialmente refletidas, ao entrarem em contato com o objeto. Assim, as ondas refletidas são detectadas pelo receptor, possibilitando o cálculo da distância.

As principais vantagens associadas à utilização do ultrassom para a realização de medições de distâncias estão relacionadas com a baixa influência de variáveis como luz, fumaça e interferência eletromagnética. No entanto, como pode ser observado na Equação 4.2, a temperatura do meio em que a

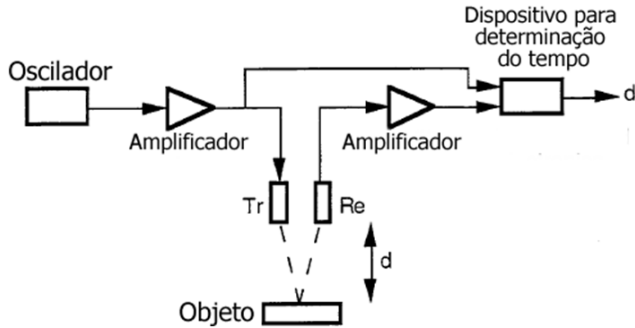


Figura 14: Representação esquemática de sistema de medição de distâncias por meio de ultrassom (WEBSTER, 1999)

onda se propaga influencia diretamente na obtenção do resultado da medição (no ar a velocidade de deslocamento da pulso ultrassônico varia aproximadamente 0,6 m/s à cada variação de 1 °C).

Para medir o tempo de propagação do eco de um pulso ultrassônico é essencial que alguma parcela de energia sônica seja refletida e novamente detectada pelo receptor. Nesse contexto, um fator que deve ser considerado corresponde à atenuação sônica. Segundo esse fenômeno, a onda sônica, ao percorrer um material qualquer, sofre em sua trajetória efeitos de dispersão e absorção resultando na redução da sua energia ao percorrer o meio em questão. Ou seja, a intensidade do sinal emitido e dos ecos refletidos diminui com o aumento da distância percorrida pela onda, o que pode ser prejudicial na medição de níveis piezométricos devido à existência de casos em que a distância a ser medida seja, por exemplo, maior a 60 metros. Ainda, devido à diferença de impedância acústica entre os dois meios (água e o ar), grande parte do sinal incidente na água seria refletido. Contudo, devido ao ângulo de abertura do pulso ultrassônico e ao reduzido diâmetro do piezômetro, a ocorrência de “falsos ecos” resultaria em medições inconsistentes inviabilizando assim a utilização deste princípio.

## 4.2 Radiofrequência

Em 1864, James Clerk Maxwell, já considerava a existência de ondas de rádio com a sua teoria do eletromagnetismo. Demonstrou matematicamente que as ondas eletromagnéticas se deslocam com a mesma velocidade

no espaço livre, independentemente do seu comprimento de onda. Pouco depois, em 1886-1887, Heinrich Rudolf Hertz, confirmou experimentalmente a teoria de Maxwell e ainda verificou que tais ondas eletromagnéticas são refletidas por corpos metálicos ou dielétricos. Além disso, demonstrou também que as ondas de rádio apresentam difração, refração, polarização e interferência, tal como a luz (DEVINE, 2000).

Posteriormente, no início do século XX, equipamentos para detecção de objetos metálicos com base na utilização de ondas eletromagnéticas foram se desenvolvendo, com destaque nos períodos próximos a Segunda Guerra Mundial, onde diversos países como Inglaterra, Alemanha, Estados Unidos, Itália e União Soviética desenvolveram, independentemente, técnicas para reconhecimento de objetos como navios e aviões.

Nesse contexto, um dos dispositivos mais utilizados corresponde ao RADAR, do inglês *Radio Detecting And Ranging*. O RADAR corresponde a um elemento emissor/receptor de ondas eletromagnéticas, chamado de antena, capaz de identificar a localização de objetos, denominados *targets*. De um modo resumido, seu princípio de operação segue as seguintes etapas (SKOLNIK, 2008):

1. O radar irradia energia eletromagnética a partir de uma antena;
2. Certa parcela da energia radiada é interceptada pelo *target*;
3. A energia interceptada pelo *target* é refletida devido à diferença de constante dielétrica entre os meios;
4. Parcela dessa energia re-irradiada retorna e é recebida pela antena;
5. O sinal recebido é amplificado e por meio da análise desse sinal pode-se saber a sua posição em relação à posição da antena.

Na indústria esse princípio é utilizado em diversas aplicações e entre as suas principais vantagens destacam-se a medição sem contato direto com o material e também a baixa influência da variação da temperatura, pressão, densidade e composição do material e do gás (geralmente ar) contido no interior do reservatório onde deseja-se efetuar a medição de nível (DEVINE, 2000).

Ondas eletromagnéticas também são utilizadas para medição de níveis em tanques nos quais o líquido apresenta turbulência em excesso ou formação de espuma. Nesses casos a medição por meio de técnicas sem contato como ultrassom é dificultada devido à existência de falsos ecos que não indicam o verdadeiro nível. Para contornar o efeito da turbulência são utilizados tubos, geralmente de aço inoxidável e com baixa rugosidade superficial interna,

abertos nas duas extremidades. Desse modo, a medição é realizada com base no nível do líquido no interior do tubo chamado também de *stilling well* ou poço de tranquilização, pois líquido presente em seu interior não estará sujeito a variações bruscas e, se for o caso, não apresentará quantidade excessiva de espuma (LABORATORY, 2001; DEVINE, 2000).

Outra alternativa que utiliza fundamentos da radiofrequência para medição de níveis corresponde a utilização de *guidewaves* (guias de onda). Uma sonda é posicionada no interior do local onde se deseja efetuar a medição de nível. Essa sonda tem a função de “guiar” a onda eletromagnética evitando assim falsos ecos. De modo idêntico ao que ocorre com ondas livres, a onda eletromagnética ao entrar em contato com o líquido sofre reflexão e a distância pode ser determinada a partir da análise da onda refletida. No entanto, para o correto funcionamento do conjunto, o guia de onda não deve entrar em contato com a parede do reservatório (KTEKCORPORATION, 2008).

Boulanger et al. (1970) apresentaram um estudo abordando a aplicabilidade de radiofrequência para medição de níveis piezométricos, aonde três distintas técnicas foram avaliadas. No entanto, apenas estudos preliminares foram realizados nesse trabalho e os autores ressaltaram que mais estudos são necessários afim de encontrar um instrumento que, fundamentado nessa técnica, seja adequado para a medição de níveis em piezômetros. Além disso, para as configurações apresentadas nesse trabalho são necessárias adaptações, que devem ser efetuadas antes da instalação dos piezômetros, com o intuito melhorar as condições para a reflexão do sinal eletromagnético. Além desse trabalho, não foram encontradas outras referências que abordavam a utilização de radiofrequência para a medição de nível em piezômetros.

### 4.3 Transmissor de pressão hidrostática

Este método consiste em um dos mais simples e também mais utilizados na indústria para medição de níveis em processos que envolvem líquidos de densidade constante. O transdutor, também denominado de sonda, é suspenso por um cabo e posicionado na extremidade inferior do reservatório. O nível da substância é determinado em função da pressão exercida pela coluna de líquido no diafragma do transdutor. Quando necessário, a compensação da pressão atmosférica é realizada por meio de “tubo de respiro” de pequeno diâmetro existente no interior do cabo que suspende o transdutor (TANDESKE, 1991).

Para a medição de níveis piezométricos, transmissores de pressão

dessa natureza seriam adequados do ponto de vista metrológico, existindo instrumentos compatíveis com relação à faixa de medição e incerteza de medição requeridas (TANDESKE, 1991). No entanto, seria necessário que um transmissor estivesse posicionado em cada piezômetro. As leituras poderiam ser completamente automatizadas, porém em virtude da necessidade das inspeções visuais, um dispositivo portátil para a realização das leituras deveria ser utilizado.

Dentre as desvantagens relacionadas com a utilização desses dispositivos destaca-se o alto custo de instalação em virtude da grande quantidade de piezômetros existentes. Além desse fato, quando são utilizados transdutores de pressão submersos em água pode ocorrer a adesão de partículas ou camadas de microorganismos sub-aquáticos com o passar do tempo. Desse modo, o transdutor deve ser frequentemente limpo e calibrado com o intuito de preservar as suas características metrológicas (CHANG, H. S., 1998).

#### **4.4 Medição de nível por borbulhamento**

A medição de nível por borbulhamento corresponde a uma técnica frequentemente utilizada na medição de nível em líquidos que apresentam densidade constante em reservatórios nos quais o acesso à extremidade inferior é dificultada (CHANG, H. S., 1998). Além da medição de nível, esse princípio pode ser utilizado para a medição da densidade de líquidos e detecção de interfaces entre dois ou mais líquidos. A pressão de borbulhamento varia em função do peso específico e da altura da coluna de líquido e é independente do volume ou do formato do reservatório (DOEBELIN, 1983).

Devido as suas principais características, apresentadas à seguir, este princípio de medição foi avaliado neste trabalho para a medição de níveis piezométricos.

##### **4.4.1 Princípio de medição**

Na medição de nível por borbulhamento, um duto com a extremidade inferior devidamente preparada (chanfrada ou dentada) é submersa no líquido cujo nível se deseja medir. Através da extremidade superior é fornecido ar ou gás inerte a uma vazão constante e, por meio de um transmissor de pressão, a pressão no interior do duto de medição é monitorada. Conforme o gás é insuflado no interior do duto de medição, a pressão interna é progressivamente elevada e a água contida em seu interior é expulsa até o instante em que se inicie o borbulhamento. Nesse instante, a pressão interna no tubo de

medição tende a se equilibrar com a pressão exercida pela altura hidrostática do líquido. A Figura 15 apresenta uma representação esquemática de reservatório no qual se deseja efetuar a medição de nível juntamente com o duto de medição em duas situações: antes da insuflação de ar comprimido (a) e no instante do borbulhamento (b).

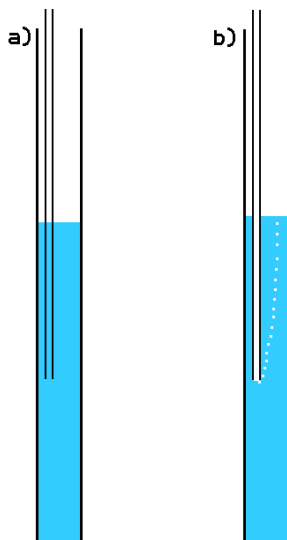


Figura 15: Representação esquemática do princípio de medição de nível por borbulhamento

Diferentemente do que ocorre com a medição de nível com transmissor de pressão hidrostática que permanece submerso no líquido, na medição de nível por borbulhamento o transmissor de pressão não entra em contato com o líquido. Desse modo, são evitados inconvenientes relacionados com a aderência de camadas de micro-organismos ou partículas sob o sensor de pressão (CHANG, H. S., 1998). Esse fato está relacionado também com outra importante vantagem deste princípio de medição que corresponde ao baixo custo de instalação. Não existe a necessidade de que todos os componentes do sistema de medição permaneçam fixos em cada terminal de leitura, apenas o duto de medição pode permanecer fixo no reservatório e todos os outros componentes poderão estar contidos em um conjunto portátil e assim ser transportado pelo leitorista para os terminais de leitura.

Uma restrição desse princípio de medição corresponde à necessidade

de ar comprimido. Caso o local onde serão realizadas as medições disponha de acesso a energia elétrica pode ser utilizado um minicompressor instalado próximo ao local. Caso contrário, deverá ser utilizado um suprimento portátil de gás de medição. No instante do borbulhamento a vazão do gás utilizado deve ser constante e baixa com o intuito de garantir-se uma borbulhamento suave e contínuo. Assim, devido a baixa vazão necessária, um pequeno cilindro contendo gás de medição poderá ser utilizado em diversas medições e recarregado quando necessário. Ainda devido à baixa vazão, a perda de carga no interior do duto de medição tende a ser desprezível e geralmente é desconsiderada<sup>2</sup> (WILSON, 2005).

#### 4.4.2 Faixa de medição

A faixa de medição corresponde ao intervalo de valores do mensurando para o qual o sistema de medição foi desenvolvido para operar (INMETRO, 2007). Na medição de nível piezométrico por meio da pressão de borbulhamento a faixa de medição está diretamente relacionada com o comprimento do duto de medição utilizado, sendo assim variável de acordo com o piezômetro no qual será efetuada a medição. Para cada piezômetro deverão ser consideradas as seguintes características: comprimento da região não preenchida, que corresponde a diferença entre a cota da extremidade superior do piezômetro e a cota do nível d'água em seu interior, assim como a variabilidade do comportamento do nível d'água em seu interior. Analisando-se esses atributos, juntamente com o auxílio da equipe técnica de instrumentação, o comprimento do duto de medição, que será inserido e fixado no interior de cada piezômetro, poderá ser estimado de modo a garantir que a sua extremidade inferior permaneça submersa.

A altura da coluna de líquido<sup>3</sup> possível de ser medida está relacionada com a pressão disponível do gás utilizado para o borbulhamento. De acordo com a literatura já foram realizadas medições de colunas d'água de até 40 metros e já foram utilizados dutos de medição com comprimento de até 200 metros (SIGHIERI; NISHINARI, 1980).

Assim, com disponibilidade de pressão no reservatório do gás a ser insuflado e com os componentes do sistema de medição devidamente dimensionados, a faixa de medição poderá ser adequada, com facilidade, para a

---

<sup>2</sup>A perda de carga, considerando-se um duto de medição com características idênticas a do utilizado neste trabalho e comprimento de 60 metros com vazão de ar comprimido de 50 ml/min, foi calculada com base na equação de *Darcy-Weisbach* e ficou abaixo da própria resolução do protótipo do sistema de medição, podendo ser desprezada.

<sup>3</sup>Coluna de líquido acima da extremidade inferior do duto de medição



realização de medições em piezômetros com características semelhantes aos encontrados na barragem da usina de Itaipu.

#### 4.4.3 Equações

Nesta seção é apresentado o equacionamento realizado para que o resultado da medição possa ser obtido.

O resultado da medição deve corresponder à cota do nível d'água no interior do piezômetro. A obtenção desse valor pode ser subdividida em três etapas:

- Cálculo da altura de coluna d'água presente acima da extremidade inferior do duto de medição;
- Correção devido à expulsão da água contida no interior do duto de medição;
- Indicação do resultado da medição.

A seguir essas três etapas são descritas.

##### 4.4.3.1 Cálculo da altura de coluna d'água

Na Figura 16, são apresentadas as alturas ( $h$ ), os pesos específicos ( $\gamma^4$ ) e as pressões ( $P$ ) envolvidas na medição de nível no instante do borbulhamento (CHANG, H. S., 1998).

A pressão atuante na cota da extremidade inferior do duto de medição, na região externa do duto de medição corresponde à soma algébrica da pressão exercida pela coluna de ar ( $\gamma_{ar} h_{ar}$ ) com a pressão exercida pela coluna d'água ( $\gamma_{H_2O} h_{H_2O}$ ). Por outro lado, na mesma cota, agora no interior do duto de medição, a pressão atuante corresponde à soma da pressão medida pelo transmissor de pressão ( $P_m$ ) com a pressão exercida pela coluna do ar de medição utilizado ( $\gamma_m h_0$ ). Esse equacionamento é apresentado na Equação 4.3.

$$\gamma_{ar} h_{ar} + \gamma_{H_2O} h_{H_2O} = P_m + \gamma_m h_0 \quad (4.3)$$

Onde:

$\gamma_{ar}$  - Peso específico do ar presente na atmosfera [ $N/m^3$ ];

$h_{ar}$  - Comprimento da região não preenchida [ $m$ ];

---

<sup>4</sup>Produto da massa específica pela aceleração da gravidade ( $\gamma=\mu \cdot g$  [ $N/m^3$ ])

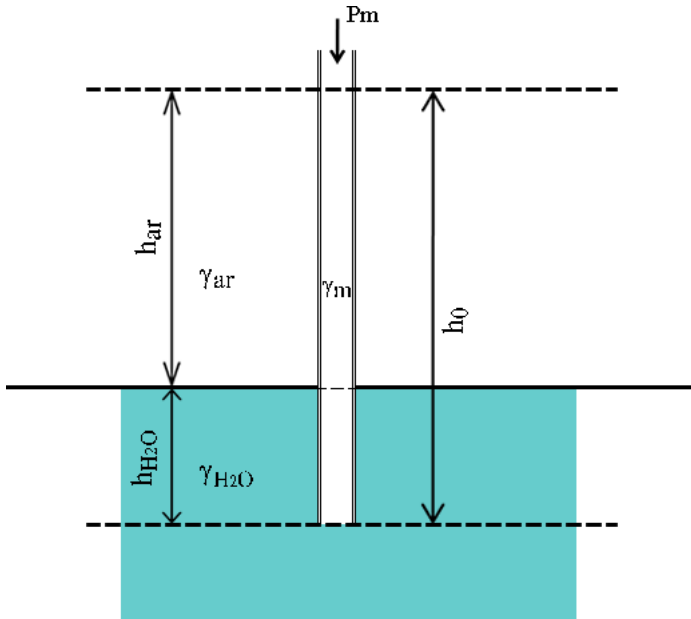


Figura 16: Representação esquemática das principais variáveis envolvidas no instante do borbulhamento

$\gamma_{H_2O}$  - Peso específico da água [ $N/m^3$ ];

$h_{H_2O}$  - Coluna d'água acima da extremidade inferior do duto de medição [ $m$ ];

$P_m$  - Pressão medida pelo transmissor de pressão [ $Pa$ ];

$\gamma_m$  - Peso específico do gás utilizado na medição no instante do borbulhamento [ $N/m^3$ ];

$h_0$  - Comprimento total do duto de medição [ $m$ ].

Sabendo-se que  $h_{ar} = h_0 - h_{H_2O}$ , a Equação 4.3 pode ser reescrita do seguinte modo (Equação 4.4):

$$h_{H_2O} = \frac{P_m + (\gamma_m - \gamma_{ar}) h_0}{\gamma_{H_2O} - \gamma_{ar}} \quad (4.4)$$

Desse modo, por meio da Equação 4.4, a altura da coluna d'água acima da extremidade inferior do duto de medição pode ser calculada. É impor-

tante ressaltar que de acordo com Equação 4.4 a influência do peso da coluna de ar presente no interior do duto de medição é também considerada. Essa consideração deve ser realizada devido ao fato de que a pressão medida pelo transmissor, localizado próximo à boca do piezômetro, não corresponder à pressão atuante no local onde ocorre o borbulhamento devido ao peso da coluna do gás comprimido contido no interior do duto de medição (CHANG, H. S., 1998).

O peso específico ( $\gamma$ ) de uma substância corresponde ao produto entre a sua massa específica e a aceleração da gravidade. À seguir é apresentado como os pesos específicos envolvidos na Equação 4.4 podem ser determinados.

#### ***Peso específico do ar de medição***

Para o cálculo da massa específica do gás comprimido utilizado na medição, pode ser utilizada a equação dos gases perfeitos (WYLEN; SONNTAG; BORGNACKE, 2003). Assim, consirando-se a pressão absoluta do ar medição como sendo a soma algébrica da pressão atmosférica com a pressão diferencial medida pelo transmissor de pressão, o peso específico do ar de medição pode ser calculado de acordo com a Equação 4.5.

$$\gamma_m = \frac{(P_{atm} + P_m)}{R T_m} g \quad (4.5)$$

Onde:

$\gamma_m$  - Peso específico do ar comprimido utilizado na medição [ $N/m^3$ ];

$P_{atm}$  - Pressão atmosférica [ $Pa$ ];

$P_m$  - Pressão medida pelo transmissor de pressão [ $Pa$ ];

$T_m$  - Temperatura do ar de medição [ $K$ ];

$g$  - Aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ];

$R$  - Constante dos gases perfeitos para o ar seco [ $J/(kg K)$ ].

#### ***Peso específico do ar atmosférico***

De modo semelhante ao efetuado para a estimativa do peso específico do ar de medição, o peso específico do ar atmosférico foi obtido à partir do produto entre a massa específica do ar ambiente e a aceleração da gravidade, conforme apresentado na Equação 4.6.

$$\gamma_{ar} = \frac{P_{atm}}{R T_{amb}} g \quad (4.6)$$

Onde:

$\gamma_{ar}$  - Peso específico do ar atmosférico [ $kg/m^3$ ]

$P_{atm}$  - Pressão atmosférica [Pa];

$T_{amb}$  - Temperatura ambiente [K];

$g$  - Aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ];

$R$  - Constante dos gases perfeitos para o ar seco [ $J/(kg K)$ ].

### ***Peso específico da água contida no interior do piezômetro***

O peso específico da água é obtido pelo produto entre a massa específica da água e a aceleração da gravidade (Equação 4.7). Por sua vez, a massa específica varia em função da pressão e, principalmente, em função da temperatura do líquido e seus valores são encontrados em tabelas de propriedades termodinâmicas (WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2003).

$$\gamma_{H_2O} = \mu_{H_2O} g \quad (4.7)$$

#### **4.4.3.2 Correção devido à expulsão da água contida no interior do duto de medição**

Devido à presença do duto de medição e ao diâmetro reduzido do piezômetro, no instante do borbulhamento ocorre uma elevação no nível da água no interior do piezômetro. Essa elevação ocorre devido ao fato de que para que ocorra o borbulhamento, o líquido contido no interior do duto de medição deve ser expelido (Figura 17). Consequentemente, por esse motivo, o valor medido pelo transmissor de pressão no instante do borbulhamento não corresponderá à pressão exercida pela coluna de água correspondente ao valor verdadeiro do nível. No entanto, como as dimensões do duto de medição e do piezômetro são conhecidas, a correção relativa ao acréscimo do nível devido à expulsão do líquido contido no interior do duto de medição poderá ser realizada.

O volume ocupado pelo líquido inicialmente contido no interior do duto de medição juntamente com o volume ocupado pela região submersa do mesmo duto ( $V_d$ ) se iguala ao acréscimo no volume na região externa ao duto de medição ( $V_{ext}$ ), ou seja, a região entre o diâmetro externo do duto de medição e o diâmetro interno do piezômetro.

$$V_d = V_{ext} \quad (4.8)$$

Desse modo, para piezômetros posicionados verticalmente:

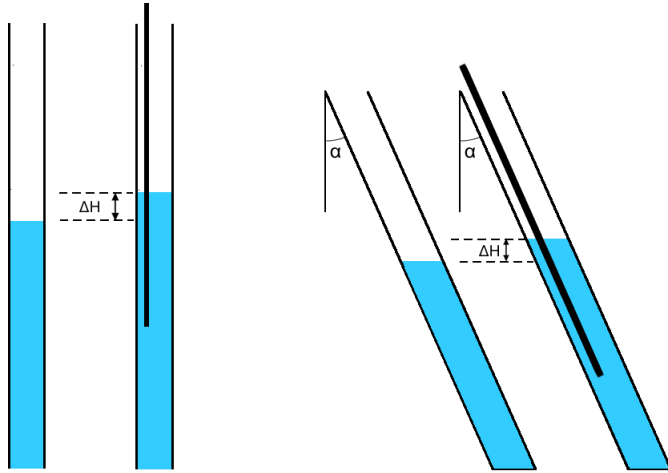


Figura 17: Representação esquemática do acréscimo do nível d'água ocasionado devido à presença do duto de medição e expulsão do líquido contido em seu interior. (a) piezômetro na posição vertical e (b) piezômetro inclinado

$$\frac{\pi}{4} d_{duto}^2 h_{ind} = \frac{\pi}{4} (D_{pz}^2 - d_{duto}^2) \Delta H \quad (4.9)$$

Onde:

$d_{duto}$  - Diâmetro externo do duto de medição [m];

$h_{H_2O}$  - Altura da coluna d'água no instante do borbulhamento [m];

$D_{pz}$  - Diâmetro interno do piezômetro [m];

$\Delta H$  - Acréscimo no nível d'água devido à expulsão do líquido contido inicialmente no interior do duto de medição [m];

$\pi$  - Constante de proporcionalidade [3, 1415].

Reorganizando a Equação 4.9:

$$\Delta H = \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} h_{H_2O} \quad (4.10)$$

De modo semelhante, para piezômetros inclinados, tem-se:

$$\frac{\pi}{4} d_{duto}^2 \frac{h_{H_2O}}{\cos(\alpha)} = \frac{\pi}{4} (D_{pz}^2 - d_{duto}^2) \Delta H \quad (4.11)$$

Onde:

$\alpha$  - Inclinação do piezômetro em relação à vertical [ $^{\circ}$ ].

Reorganizando a Equação 4.11:

$$\Delta H = \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} \frac{h_{H_2O}}{\cos(\alpha)} \quad (4.12)$$

Desse modo, o valor verdadeiro do nível poderá ser estimado subtraindo-se  $\Delta H^5$  do nível indicado no instante do borbulhamento, conforme Equação 4.13 para piezômetros verticais e Equação 4.14 para piezômetros inclinados.

$$h_{real} = h_{H_2O} \left(1 - \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2}\right) \quad (4.13)$$

$$h_{real} = h_{H_2O} \left(1 - \frac{d_{duto}^2}{(D_{pz}^2 - d_{duto}^2) \cos(\alpha)}\right) \quad (4.14)$$

Onde:

$h_{real}$  - Valor verdadeiro da altura da coluna d'água acima da extremidade inferior do duto de medição [ $m$ ];

$h_{H_2O}$  - Altura da coluna d'água no instante do borbulhamento [ $m$ ];

$d_{duto}$  - Diâmetro externo do duto de medição [ $m$ ];

$D_{pz}$  - Diâmetro interno do piezômetro [ $m$ ];

$\alpha$  - Inclinação do piezômetro em relação à vertical [ $^{\circ}$ ].

#### 4.4.3.3 Indicação do resultado da medição

A indicação isolada do nível d'água acima da extremidade inferior do duto de medição não apresenta significado físico importante, uma vez que este valor depende do comprimento do duto de medição e, conseqüentemente, da cota onde está localizada a extremidade inferior do duto de medição.

Na medição de níveis piezométricos o interesse está em se determinar a cota do nível d'água em relação a um referencial conhecido e anteriormente determinado. De acordo com a padronização utilizada na usina hidrelétrica de Itaipu, a indicação do nível d'água no interior do piezômetro deverá ser efetuada em relação ao nível do mar, considerando-se que a cota da extremidade inferior e da extremidade superior (boca) de cada piezômetro foi anterior-

---

<sup>5</sup> Acréscimo no nível d'água no interior do piezômetro devido à expulsão do líquido contido no interior do duto de medição.

mente medida por topografia, em relação a esse referencial.

Desse modo, para a expressão do resultado da medição utilizando-se o princípio do borbulhamento, além do valor correspondente à altura de coluna d'água presente acima da extremidade inferior do duto de medição, deverá também ser considerado o valor da cota da extremidade inferior de cada duto de medição em relação ao referencial utilizado (nível do mar).

Assim, conhecendo-se a cota da extremidade inferior do duto de medição em relação ao referencial utilizado, o resultado da medição pode ser calculado de acordo com a Equação 4.15<sup>6</sup>.

$$ct_{nível} = ct_{fduto} + h_{real} \quad (4.15)$$

Onde:

$ct_{nível}$  - Cota do nível d'água no interior do piezômetro em relação ao referencial utilizado [m];

$ct_{fduto}$  - Cota da extremidade inferior do duto de medição em relação ao referencial utilizado [m];

$h_{real}$  - Valor verdadeiro da altura da coluna d'água acima da extremidade inferior do duto de medição [m].

Portanto, considerando-se as três etapas citadas anteriormente, a cota do nível d'água no interior de cada piezômetro pode ser determinada de acordo com a Equação 4.16, para piezômetros verticais e de acordo com a Equação 4.17 para piezômetros inclinados<sup>7</sup>.

$$ct_{nível} = ct_{fduto} + \left( \left( \frac{P_m + \frac{(P_{atm} + P_m) h_0 g}{RT_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{RT_{amb}}}{\rho_{H_2O} g - \frac{P_{atm} g}{RT_{amb}}} \right) \left( 1 - \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} \right) \right) \quad (4.16)$$

$$ct_{nível} = ct_{fduto} + \left( \left( \frac{P_m + \frac{(P_{atm} + P_m) h_0 g}{RT_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{RT_{amb}}}{\rho_{H_2O} g - \frac{P_{atm} g}{RT_{amb}}} \right) \left( 1 - \frac{d_{duto}^2}{(D_{pz}^2 - d_{duto}^2) \cos(\alpha)} \right) \right) \quad (4.17)$$

<sup>6</sup> A determinação da cota da extremidade inferior do duto de medição é discutida na seção 6.3

<sup>7</sup> As siglas e abreviações foram apresentadas anteriormente neste mesmo capítulo.





## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Considerações iniciais

Neste Capítulo serão apresentados os materiais e os métodos utilizados para a avaliação do princípio de medição proposto para a medição de níveis piezométricos. Primeiramente são apresentados os equipamentos utilizados para a confecção do protótipo e da bancada de avaliação e, posteriormente, os métodos de avaliação.

### 5.2 Protótipo do sistema de medição

#### 5.2.1 Equipamentos

Os componentes utilizados para a confecção do protótipo estão listados abaixo e as suas principais características estão apresentadas a seguir:

- duto de medição;
- transmissor de pressão;
- placa de aquisição de sinais;
- suprimento de ar comprimido;
- regulador de pressão;
- regulador de vazão;
- conexão pneumática em T;
- magueira pneumática;
- microcomputador.

#### *Duto de medição*

Na Tabela 1 estão apresentadas as principais características do duto de medição.

A extremidade inferior do duto de medição foi preparada de modo a apresentar um corte no formato aproximado de um triângulo isósceles com os ângulos congruentes posicionados na região final do duto de medição (Figura 18). As dimensões utilizadas foram de aproximadamente  $h = 7 \text{ mm}$  e  $\alpha = 30^\circ$ , medidas com paquímetro.

Tabela 1: Características do duto de medição

Material	poliéster-poliuretano
Diâmetro externo	6 mm
Espessura da parede	1,05 mm

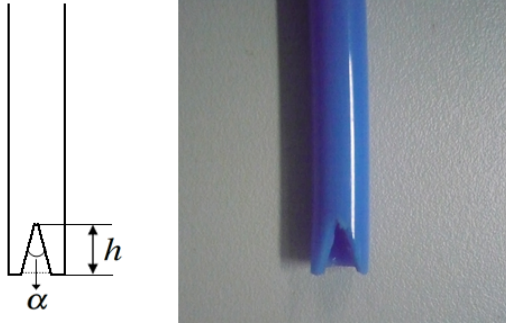


Figura 18: Extremidade inferior do duto de medição

### ***Transmissor de pressão***

Na Tabela 2 estão apresentadas as principais características do transmissor de pressão utilizado.

Tabela 2: Características do transmissor de pressão

Fabricante	WIKA
Faixa de medição	0 à 0,6 bar
Ajuste	Zero e span (ganho)
Sinal de saída	4 à 20 mA
Alimentação	10 à 30 Vcc
Exatidão	0,25% da FM
Deriva térmica	0,4% da FM /10 K
Deriva temporal	0,2% da FM /ano
Conexão ao processo	1/2 BSP

### ***Placa de aquisição de sinais***

As principais características da placa de aquisição utilizada estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Características da placa de aquisição de sinais

Fabricante	National Instruments
Tipo de sinal de leitura	Corrente
Faixa de leitura	-20 a +20 mA
Taxa de aquisição máxima	200 kS/s
Resolução	16 bits
Sistema operacional	Windows
Interface com microcomputador	USB

### ***Suprimento de ar comprimido***

O ar comprimido utilizado foi proveniente da estação (compressor/reservatório) que alimenta a rede de ar comprimido do edifício onde está localizado o Laboratório de Metrologia e Automatização — LABMETRO da Universidade Federal de Santa Catarina — UFSC. A pressão de trabalho máxima é de 8 bar e o ar comprimido se encontra a temperatura ambiente.

### ***Filtros reguladores de pressão***

Foram utilizados dois filtros reguladores de pressão posicionados em série. As suas principais características estão apresentadas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4: Características do filtro regulador de pressão A

Fabricante	Festo
Especificação	LFR MINI
Faixa de pressão primária	1,5 a 12 bar
Faixa de pressão de trabalho	0,5 a 7 bar
Grau de filtragem	$\leq 40 \mu\text{m}$
Faixa de temperatura	-10 a +60 °C
Peso	0,460 kg

Tabela 5: Características do filtro regulador de pressão B

Fabricante	Parker
Especificação	14E11B13FC1
Faixa de pressão primária	até 20 bar
Faixa de pressão de trabalho	até 8 bar
Grau de filtragem	$\leq 5 \mu\text{m}$
Faixa de temperatura	0 a +52 °C
Peso	0,180 kg

### ***Regulador de vazão***

A Tabela 6 apresenta as principais características do regulador de vazão.

Tabela 6: Características do regulador de vazão

Fabricante	Festo
Especificação	GRP-10-PK3
Elemento de ajuste	Botão giratório
Faixa de ajuste da vazão	0 a 1,7 litro/minuto
Pressão de funcionamento	0 a 6 bar
Temperatura do fluido	-10 a +50 °C

Adicionalmente apresenta-se o comportamento da vazão de ar comprimido de acordo com o posicionamento do botão giratório da válvula reguladora de vazão (Figura 19). Conforme pode ser observado no gráfico, para uma dada posição do botão giratório existe um intervalo de valores para nos

quais a vazão pode estar situada. Essa variação é devida à pressão do ar comprimido na entrada da válvula. Quanto maior a pressão na entrada da válvula, maior a vazão resultante.

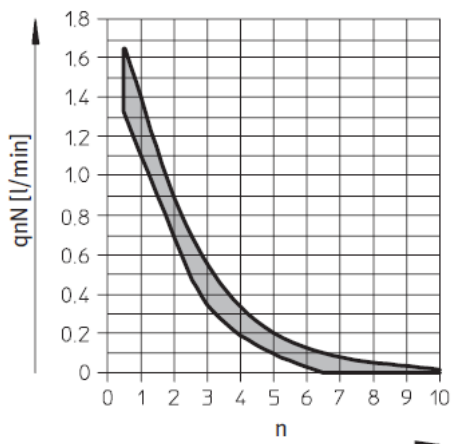


Figura 19: Comportamento da vazão de ar comprimido em função da abertura da válvula (FESTO, 2009)

### ***Conexão pneumática em T***

As principais características da conexão pneumática em T estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Características da conexão pneumática em T

Fabricante	Festo
Pressão de operação	-0,95 a +10 bar
Temperatura de trabalho	0 a +60°C
Tipo da conexão	Engate rápido ( <i>quick star</i> )

### ***Mangueria pneumática***

A mangueira pneumática utilizada para efetuar as conexões entre o suprimento de ar comprimido e o duto de medição apresenta as mesmas características do duto de medição, apresentadas na Tabela 1.

### ***Microcomputador***

Foi utilizado um microcomputador portátil com processador de 1,6 GHz, 2 GB de memória RAM, sistema operacional Windows e interface USB (*Universal Serial Bus*). Entretanto, qualquer computador com interface USB e capacidade para suportar o ambiente de programação LabVIEW seria adequado para a aplicação.

#### ***5.2.2 Calibração da cadeia de medição de pressão***

A cadeia de medição de pressão, composta pelo transmissor de pressão, fonte de alimentação do transmissor de pressão, placa de aquisição de sinais e o microcomputador, foi calibrada no Laboratório de Força, Pressão e Massa da Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - Fundação CERTI.

O Sistema de Medição Padrão - SMP utilizado para a calibração foi a Máquina Padrão Digital de Pressão (*Desgranges et Huot*), cuja incerteza expandida é de 0,0003 bar (0,03 kPa).

De acordo com o certificado de calibração<sup>1</sup>, a maior incerteza de medição encontrada, considerando-se que seja efetuada a respectiva correção, é de 0,04 kPa (equivalente a aproximadamente 4 milímetros de coluna d'água). É importante ressaltar que o principal objetivo da calibração foi de realizar uma verificação do funcionamento do transmissor de pressão e que o resultado fornecido pelo certificado de calibração não foi considerado nas avaliações de incerteza realizadas no trabalho.

#### ***5.2.3 Sistema computacional de medição***

Para a concepção do protótipo do sistema de medição tornou-se necessário o desenvolvimento de um sistema computacional capaz de adquirir os dados provenientes do transmissor de pressão, processá-los e indicar o resultado da medição.

Devido ao fato do sinal de medição, proveniente do transmissor de pressão, ser em corrente elétrica, foi utilizado uma placa de aquisição (Tabela 3), com o objetivo adequar o sinal de medição para aquisição por meio do microcomputador.

A implementação do sistema de medição foi realizada utilizando-se a linguagem LabVIEW<sup>2</sup> o que permitiu o processamento e a visualização dos

---

<sup>1</sup> O certificado de calibração da cadeia de medição de pressão está apresentado no Anexo A.

<sup>2</sup> <http://www.ni.com/labview/>

dados de modo apropriado.

A Figura 20 apresenta a tela principal do sistema computacional desenvolvido. Nela são inseridos os seguintes parâmetros de entrada:

- cota da boca do piezômetro;
- cota da extremidade inferior do duto de medição;
- diâmetro interno do piezômetro;
- inclinação do piezômetro;
- diâmetro externo do duto de medição.

Durante a medição, conforme o ar comprimido é insuflado para o interior do duto de medição, o sistema computacional adquire os dados correspondentes à pressão manométrica no interior do duto de medição à uma taxa média de 5 dados por segundo. Esses dados são apresentados graficamente em tempo real na janela do sistema e, após o início do borbulhamento, o sistema computacional identifica o instante em que o sinal de pressão se estabiliza<sup>3</sup> e calcula a altura da coluna d'água presente acima da extremidade inferior do duto de medição. Adicionalmente, efetua as devidas correções e indica o resultado da medição, correspondente à cota do nível d'água no interior do piezômetro.

### **5.3 Bancada para avaliação em laboratório**

Para que o protótipo pudesse ser avaliado, fez-se necessária a montagem de uma bancada que permitisse a comparação entre o valor indicado pelo sistema de medição e o valor do mensurando<sup>4</sup>. A seguir são apresentados os componentes utilizados para a montagem da bancada, assim como os procedimentos para o ajuste e leitura do padrão de nível.

#### **5.3.1 Equipamentos**

Para a montagem da bancada foram utilizados os seguintes componentes:

---

<sup>3</sup>É possível também finalizar a medição por meio da interface gráfica do sistema computacional.

<sup>4</sup>Melhor estimativa do “valor verdadeiro” do mensurando (INMETRO, 2007).

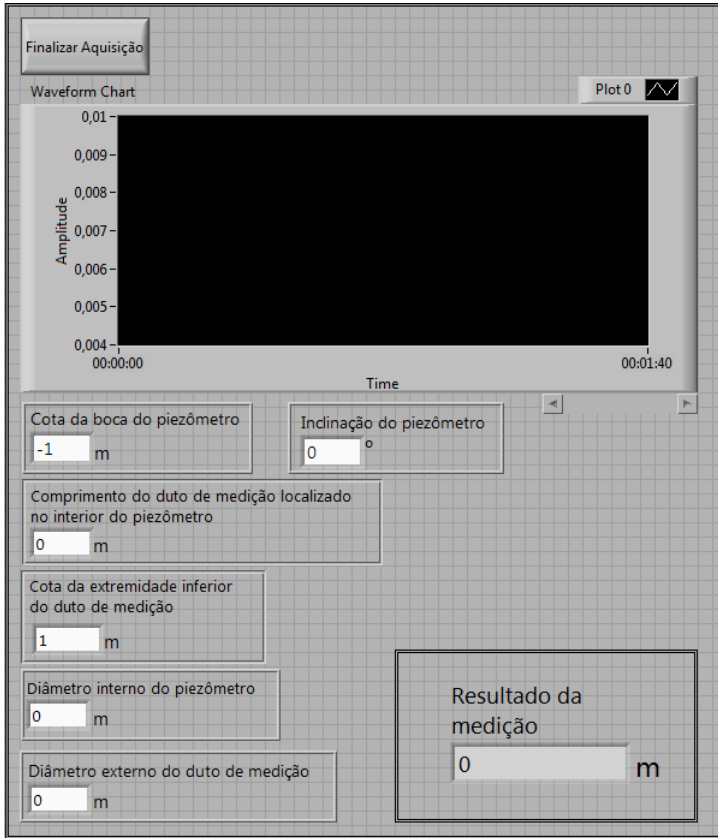


Figura 20: Ilustração da janela de trabalho do sistema computacional desenvolvido

- placa lisa de madeira compensada (altura: 2,2 m; largura: 0,6 m e espessura: 8 mm);
- mangueira de PVC transparente “tipo cristal” (comprimento: 2,4 m; diâmetro interno: 19,05 mm e espessura da parede: 2 mm);
- guias para fixação da mangueira na placa de madeira;



- escala graduada calibrada<sup>5</sup> (faixa de medição: 10 m; resolução: 1 mm);
- válvula para esvaziamento e ajuste do nível d'água no interior da mangueira transparente.

Na Figura 21 é apresentada uma representação esquemática e, na Figura 22, uma ilustração dos componentes da bancada e do protótipo devidamente posicionados.

---

<sup>5</sup>A escala graduada foi calibrada no Laboratório de Metrologia Dimensional da Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras — CERTI. De acordo com o certificado de calibração, apresentado no Anexo B, o erro máximo apresentado pela trena, considerando-se a faixa de medição utilizada neste trabalho, é de 0,45 mm.

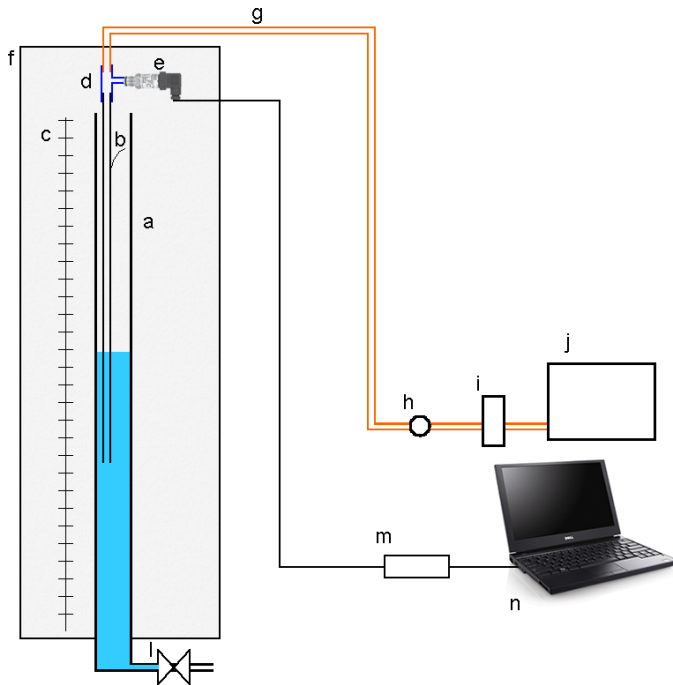


Figura 21: Representação esquemática do equipamentos utilizados juntamente com a bancada: (a) Mangueira PVC transparente, (b) duto de medição, (c) escala graduada, (d) conexão tripla via, (e) transmissor de pressão, (f) placa de madeira, (g) mangueira pneumática, (h) regulador de vazão, (i) conjunto de filtros reguladores de pressão, (j) suprimento de ar comprimido, (l) válvula para ajuste do nível, (m) placa de aquisição de sinais e (n) microcomputador

### 5.3.2 Procedimento de ajuste e leitura do nível padrão

Para ajuste do nível d'água no interior da mangueira transparente foi utilizado um funil para auxiliar na introdução da água pela extremidade superior da mangueira e uma válvula, posicionada na extremidade inferior, para o ajuste fino do nível.

O sistema de medição padrão — SMP foi representado pela escala graduada posicionada paralelamente em relação à mangueira transparente. A leitura do “nível padrão” era sempre efetuada antes da inserção do duto

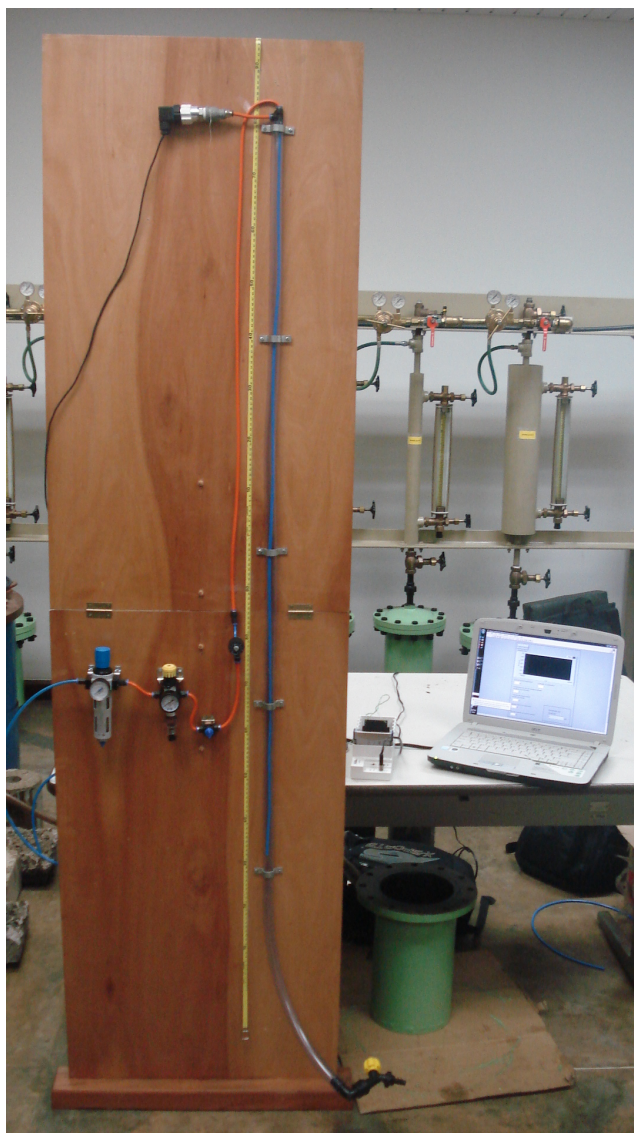


Figura 22: Imagem da bancada montada em laboratório

de medição com auxílio de um guia retilíneo posicionado entre a placa de madeira e a mangueira transparente de modo a permitir a leitura mais eficiente na escala graduada (Figura 23).

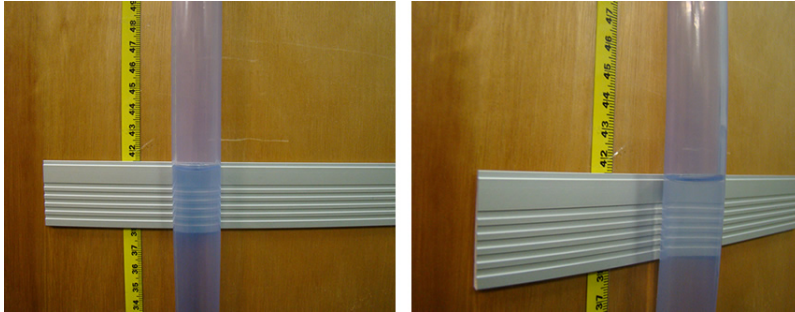


Figura 23: Representação da leitura do nível do sistema de medição padrão. Vista frontal (à esquerda) e vista lateral (à direita)

## 5.4 Métodos de avaliação

A avaliação metrológica do sistema de medição proposto consistiu na avaliação da incerteza de medição. Nesse contexto, foram realizadas duas análises, uma teórica e outra experimental, as quais serão apresentadas a seguir.

Do ponto de vista operacional, uma avaliação do princípio de medição de nível por borbulhamento foi apresentada na Seção 4.4 e uma discussão adicional sob esse mesmo aspecto será realizada no Capítulo 6.

### 5.4.1 Avaliação teórica da incerteza de medição

#### 5.4.1.1 Lei de propagação da incerteza

Por meio desta análise, busca-se determinar a incerteza expandida<sup>6</sup> dos resultados das medições efetuadas de acordo com o princípio de medição proposto para utilização neste trabalho.

---

<sup>6</sup>Grandeza que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (BIPM; IEC; IFCC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML, 2003).

Na medição de nível por borbulhamento, assim como em diversas outras situações, o mensurando não é obtido através de medição direta, mas a partir da combinação de outras grandezas. De um modo genérico pode-se considerar que um mensurando  $Y$  é determinado a partir das grandezas  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$  através de uma relação funcional  $f$  (Equação 5.1)<sup>7</sup>:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (5.1)$$

Desse modo, a estimativa  $y$  do mensurando  $Y$  e a incerteza padrão de  $y$ , são obtidas pela combinação apropriada das estimativas das grandezas de entrada  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$  e de suas respectivas incertezas padrão<sup>8</sup>. Essa combinação de incertezas pode ser efetuada por meio da lei de propagação da incerteza e resulta na chamada *incerteza padrão combinada* da estimativa  $y$ . Considerando-se que as grandezas de entrada não sejam correlacionadas, a combinação das incertezas padrão das estimativas de entrada  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ , pode ser realizada, de acordo com a lei da propagação de incerteza, por meio da Equação 5.2.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (5.2)$$

Onde:

$u_c(y)$  - Incerteza padrão combinada da estimativa  $y$ ;

$f$  - Função que correlaciona as variáveis de entrada;

$\partial f / \partial x_i$  - Derivada parcial da função  $f$  em relação à variável  $x_i$ ; Termo conhecido também como coeficiente de sensibilidade da variável  $x_i$ ;

$u(x_i)$  - Incerteza padrão da variável  $x_i$ .

Desse modo, a incerteza expandida ( $U$ ) pode ser determinada multiplicando-se a incerteza padrão combinada ( $u_c(y)$ ) pelo fator de abrangência  $k$ <sup>9</sup> (Equação 5.3).

<sup>7</sup>A modelagem matemática e as equações que determinam o nível de líquido com base na pressão de borbulhamento foram apresentados na Seção 4.4. No presente capítulo é considerado o equacionamento genérico com o intuito de simplificação.

<sup>8</sup>Incerteza do resultado de uma medição expressa como desvio padrão (BIPM; IEC; IFCC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML, 2003).

<sup>9</sup>Também conhecido como coeficiente *t de Student*, corresponde a um fator numérico, tipicamente no intervalo entre 2 e 3, relacionado com nível de confiança desejado e o número de graus de liberdade. Neste trabalho, o fator de abrangência  $k$  foi obtido a partir do número de graus de liberdade efetivos ( $v_{ef}$ ) para um nível de confiança de 95,45%.

$$U = k u_c(y) \quad (5.3)$$

#### 5.4.1.2 Estimativa das grandezas de entrada

Como foi observado na seção anterior, para a determinação da incerteza expandida do resultado de uma medição, é necessário que os valores das grandezas de entrada sejam conhecidas juntamente com as suas respectivas incertezas.

Assim sendo, para a realização deste trabalho, os valores das variáveis de entrada e de suas respectivas incertezas associadas foram determinadas considerando-se informações disponíveis em catálogos técnicos, dados de medições prévias, dados provenientes de certificados de calibração e ainda considerando-se o conhecimento geral e de especialistas acerca das propriedades dos materiais e instrumentos.

Além de possibilitar a quantificação da estimativa da incerteza expandida do resultado da medição, a análise por meio da lei de propagação da incerteza permite também determinar a influência relativa à incerteza de cada variável na incerteza expandida do resultado da medição. No Capítulo 6 são apresentadas as considerações adotadas para a obtenção estimativas das incertezas das variáveis de entrada assim como os resultados e as discussões das análises realizadas.

#### 5.4.2 Avaliação experimental

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina - LABMETRO/UFSC<sup>10</sup>. Os experimentos realizados tiveram o objetivo de avaliar a influência da vazão de ar comprimido no resultado da medição e de analisar o comportamento metrológico do protótipo desenvolvido.

A seguir essas duas avaliações estão apresentadas.

##### 5.4.2.1 Avaliação da influência da vazão de ar comprimido

Com o intuito de avaliar a influência da vazão no resultado da medição, foram avaliadas três características de borbulhamentos originados por valores progressivos de vazões:

---

<sup>10</sup>A temperatura ambiente no local dos experimentos foi de  $20 \pm 3^\circ\text{C}$

- *borbulhamento suave*: vazão baixa, caracterizado pela liberação, em média, de 0,5 a 1 bolha por segundo;
- *borbulhamento médio*: vazão média, caracterizado pela liberação, em média, de 2 a 5 bolhas por segundo;
- *borbulhamento violento*: vazão alta, caracterizado pela dificuldade para identificação e contagem das bolhas.

Os experimentos foram realizados na bancada apresentada anteriormente, considerando-se oito pontos homogeneamente distribuídos na faixa de medição. A configuração do sistema de medição e os procedimentos efetuados para a realização desses experimentos estão apresentados a seguir:

#### ***Configuração do sistema***

Foi adotada a seguinte configuração:

- comprimento útil<sup>11</sup> da mangueira transparente: 1,8 m (Intervalo correspondente entre a cota 0,000 e a cota 1,800 m);
- cota da boca da mangueira transparente: 1,800 m;
- cota da extremidade inferior do duto de medição: 0,549 m;
- cota do nível d'água: 8 (oito) pontos homogeneamente espaçados entre as cotas 0,591 m e 1,305 m.

#### ***Procedimentos para a realização do experimento***

Antes da realização dos experimentos o transmissor de pressão permaneceu ligado à fonte de alimentação elétrica por aproximadamente duas horas para estabilização (*warm-up*).

Para cada um dos oito pontos da faixa de medição avaliados foram realizados os seguintes procedimentos:

1. Ajuste nível d'água no interior da mangueira transparente;
2. Inserção do duto de medição;
3. Verificação da cota da extremidade inferior do duto de medição;
4. Realização de medição considerando-se borbulhamento suave:

---

<sup>11</sup>Intervalo de comprimento no qual podem ser realizadas medições.

- (a) Início do fornecimento de ar comprimido;
  - (b) Medição do nível por meio do sistema computacional;
  - (c) Interrupção do fornecimento de ar comprimido.
5. Realização de medição considerando-se borbulhamento médio:
- (a) Início do fornecimento de ar comprimido;
  - (b) Medição do nível por meio do sistema computacional;
  - (c) Interrupção do fornecimento de ar comprimido.
6. Realização de medição considerando-se borbulhamento violento:
- (a) Início do fornecimento de ar comprimido;
  - (b) Medição do nível por meio do sistema computacional;
  - (c) Interrupção do fornecimento de ar comprimido.
7. Retirada e secagem do duto de medição.

Com o objetivo de avaliar as condições de repetitividade, foram realizadas, adicionalmente, dois ciclos de medição considerando-se os mesmos procedimentos apresentados anteriormente, resultado assim em 72 medições (oito pontos avaliados na faixa de medição, três condições de borbulhamento e três ciclos de medições).

Os resultados e as discussões a respeito destes experimentos estão apresentados no Capítulo 6.

#### **5.4.2.2 Calibração do sistema de medição**

Com o intuito de avaliar o comportamento metrológico do protótipo desenvolvido, foi realizada a calibração do mesmo utilizando-se a bancada também confeccionada na realização deste trabalho. A calibração do sistema de medição seguiu as orientações para a realização de calibração de medidores digitais de pressão do Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (INMETRO, 2008).

A seguir é apresentada a configuração utilizada para a realização da calibração e, posteriormente, os procedimentos realizados para a calibração e para a avaliação da incerteza de medição.

##### ***Configuração do sistema***

Foi utilizada a seguinte configuração:



- comprimento útil da mangueira transparente: 1,8 m (Intervalo correspondente entre a cota 0 e a cota 1,800 m);
- cota da boca da mangueira transparente: 1,800 m;
- cota da extremidade inferior do duto de medição: 0,422 m;
- cota do nível d'água: 10 (dez) pontos distribuídos entre as cotas 0,422 m e 1,600 m.

### *Calibração*

Os seguintes procedimentos foram realizados para a realização da calibração do sistema de medição:

1. alimentar o transmissor de pressão e aguardar a sua estabilização (*warm-up*);
2. verificar a estanqueidade do sistema, aplicando-se pressão máxima<sup>12</sup>;
3. aliviar totalmente a pressão;
4. realizar a calibração com aplicação crescente (carregamento) de pressão. Corresponde à elevação gradativa, conforme pontos definidos anteriormente, do nível d'água no interior da mangueira transparente.
5. realizar a calibração com aplicação decrescente (descarregamento) de pressão. Corresponde à redução gradativa, seguindo os mesmos pontos considerados no carregamento, do nível d'água no interior da mangueira transparente;

Tanto no carregamento quanto no descarregamento, para cada ponto calibrado, foram efetuados os seguintes procedimentos:

- (a) ajustar, de acordo com os pontos preestabelecidos, o nível d'água no interior da mangueira transparente;
- (b) inserir do duto de medição;
- (c) verificar a cota da extremidade inferior do duto de medição;
- (d) iniciar fornecimento de ar comprimido (vazão de aproximadamente 50 ml/min);

---

<sup>12</sup>Todos os locais susceptíveis a escape de ar comprimido foram verificados

- (e) efetuar medição por meio do sistema computacional;
  - (f) interromper fornecimento de ar comprimido;
  - (g) retirar e secar o duto de medição.
6. Os procedimentos 4 e 5 foram repetidos por mais duas vezes.

### ***Cálculo da incerteza de medição***

A incerteza de medição foi calculada com base na Norma NIT-DICLA-021 (2010). Para o seu cálculo, foram consideradas as seguintes fontes de incerteza:

- repetições das indicações do instrumento no ponto;
- a incerteza na medição do padrão;
- resolução do instrumento.

Os resultados e as discussões da avaliação experimental estão apresentados no Capítulo 6.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Considerações iniciais

Medir corresponde a um procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de um mensurando é determinado como um múltiplo e/ou fração de uma unidade de medição (INMETRO, 2007). Nesse contexto, de modo genérico, quando se relata o resultado de uma medição, é de grande importância que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado indicado. Somente desse modo os resultados das medições poderão ser comparados, entre si ou com valores de referência, e utilizados de maneira confiável (BIPM; IEC; IFCC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML, 2003).

Assim, para caracterizar a qualidade do resultado de uma medição é necessário que se avalie e se expresse a sua *incerteza*. A incerteza de medição, por sua vez, é definida como um parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (INMETRO, 2007).

Desse modo, para a avaliação do princípio proposto neste trabalho para a medição de níveis piezométricos, buscou-se quantificar a incerteza de medição considerando-se duas abordagens: uma teórica e outra experimental. A avaliação teórica fundamentou-se na *Lei da Propagação da Incerteza*, a qual estima a incerteza de medição resultante à partir da combinação das fontes de incerteza atuantes na medição e, conseqüentemente, possibilita a identificação dos fatores mais significativos que contribuem para a incerteza de medição. A avaliação experimental consistiu na realização da calibração do protótipo desenvolvido e na avaliação da influência da vazão de ar comprimido no resultado da medição.

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões relacionados com as duas abordagens consideradas neste trabalho.

### 6.2 Avaliação teórica da incerteza de medição

Com o intuito de avaliar a incerteza de medição e a influência das fontes de incerteza no resultado das medições de nível piezométrico por meio da técnica de medição de nível por borbulhamento, realizou-se neste trabalho uma análise fundamentada na *Lei da Propagação da Incerteza* (BIPM; IEC; IFCC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML, 2003).

Para a realização desta análise, os valores das grandezas de entrada juntamente com as suas respectivas incertezas foram determinados de modo

abrangente e realista a partir de informações disponíveis em catálogos técnicos, dados de medições prévias, dados provenientes de certificados de calibração e ainda considerando-se o conhecimento geral e de especialistas acerca das propriedades dos materiais e instrumentos. Assim, considerando-se a equação de medição (Equação 4.16), conforme cada variável for apresentada, as considerações realizadas para a estimativa de sua respectiva incerteza são conjuntamente expostas.

$$ct_{nível} = ct_{fduto} + \left( \left( \frac{P_m + \frac{(P_{atm} + P_m) h_0 g}{RT_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{RT_{amb}}}{\rho_{H_2O} g - \frac{P_{atm} g}{RT_{amb}}} \right) \left( 1 - \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} \right) \right)$$

### 6.2.1 Pressão medida pelo transmissor de pressão

$P_m$  (Pressão medida pelo transmissor de pressão) =  $47000 \pm 306 Pa$  — Esta variável está diretamente relacionada com a altura da coluna d'água contida acima da extremidade inferior do duto de medição. Corresponde à pressão atuante no transmissor de pressão no instante do borbulhamento. Para a estimativa do seu valor foram considerados os dados apresentados na Figura 12, que apresenta o intervalo máximo de variação da cota piezométrica considerando-se o período entre 2004 e 2008. Conforme foi apresentado, cerca de 95% dos piezômetros apresentaram uma variação máxima de aproximadamente 4,15 metros, sendo assim esse valor, acrescido da quantidade correspondente ao acréscimo do nível devido à presença do duto de medição, convertido para a unidade de pressão pascal<sup>1</sup>, utilizado como a estimativa para a variável  $P_m$ . A incerteza de medição considerada corresponde à combinação das seguintes fontes: incerteza declarada do transmissor de pressão (0,25% da faixa de medição), deriva térmica (0,4% da faixa de medição) e a deriva temporal considerando-se o período de um ano (0,2% da faixa de medição).

### 6.2.2 Pressão atmosférica

$P_{atm}$  (Pressão atmosférica) =  $98595 \pm 1000 Pa$  — Os dados da pressão atmosférica na cidade de Foz de Iguaçu-PR são medidos e registrados, à partir de Fevereiro de 2008, em intervalos uma hora por uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia<sup>2</sup>. Para esta análise foi considerada o valor médio da pressão atmosférica considerando-se o período entre Fevereiro

<sup>1</sup>O valor correspondente na unidade Pascal foi obtido multiplicando-se o valor em metros de coluna d'água pelo peso específico da água à 15°C e 1atm ( $\gamma = 10200N/m^3$ ).

<sup>2</sup>[www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br)

e Abril de 2010 e a estimativa da incerteza adotada corresponde à amplitude de variação máxima encontrada no mesmo período, considerando-se intervalos de 24 horas.

### 6.2.3 *Temperatura do ar de medição*

$T_m$  (Temperatura do ar de medição) =  $298 \pm 5 \text{ K}$  — Corresponde à temperatura da mistura entre o ar presente inicialmente no interior do duto de medição e o ar insuflado posteriormente. Quanto maior a altura da coluna d'água a ser medida, maior a influência da temperatura do ar insuflado na temperatura da mistura. Neste trabalho essa temperatura não foi medida, porém para a análise de incerteza foi considerado que a temperatura do ar presente no interior do duto de medição pode apresenta-se em qualquer valor no intervalo entre  $20^\circ\text{C}$  e  $30^\circ\text{C}$ .

### 6.2.4 *Aceleração da gravidade*

$g$  (Aceleração da gravidade) =  $9,791 \pm 0,001 \text{ m/s}^2$  — Os valores utilizados para a aceleração da gravidade e de sua respectiva incerteza de medição foram provenientes do Laboratório de Força, Pressão e Massa - LFPM da Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - Fundação CERTI.

### 6.2.5 *Constante de gás para a mistura*

$R$  (Constante de gás para a mistura) =  $289,5 \pm 2,5 \text{ J/(kg K)}$  — O ar presente no interior do duto de medição durante o borbulhamento consiste em uma mistura entre o ar comprimido insuflado proveniente do reservatório de ar e o ar ambiente presente na atmosfera. Para a estimativa da constante de gás dessa mistura foram considerados dois casos extremos: Considerando-se o ar seco, ou seja, sem a presença de vapor d'água e considerando-se ar úmido representado pela mistura de 97% de ar seco e 3% de vapor d'água<sup>3</sup>. Considerou-se então que o valor da constante de gás -  $R$  - para a mistura pode assumir qualquer valor, com a mesma probabilidade, no intervalo entre  $287,0 \text{ J/(kg K)}$  e  $292,0 \text{ J/(kg K)}$ .

---

<sup>3</sup>Essa proporção foi obtida à partir da carta psicrométrica considerando-se umidade relativa de 100%, temperatura de bulbo seco de aproximadamente  $32^\circ\text{C}$  e pressão atmosférica.

### 6.2.6 *Temperatura ambiente*

$T_{amb}$  (Temperatura ambiente) =  $298 \pm 3 \text{ K}$  — Nesta análise foi considerada um valor típico de temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ). Caso seja necessária a medição dessa temperatura, existem no mercado termômetros, que poderiam ser acoplados ao sistema de medição, com valor de incerteza de medição inferior ao considerado nesta análise.

### 6.2.7 *Massa específica da água contida no interior do piezômetro*

$\rho_{H_2O}$  (Massa específica da água) =  $1039,50 \pm 1,73 \text{ kg/m}^3$  — A massa específica da água está diretamente relacionada com a temperatura do líquido e existem distintos métodos que podem ser utilizados para a determinação experimental de seus valores (ZUCCHINI; THEMUDO, 2005). Além disso, existem tabelas de propriedades termodinâmicas em que são apresentados os valores da massa específica da água em função de sua pressão e temperatura (WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2003).

A temperatura da água contida no interior de piezômetros instalados em usinas hidrelétricas não corresponde a um parâmetro usualmente monitorado. No entanto, sabe-se que águas subterrâneas profundas apresentam baixa amplitude térmica não sofrendo grande influência da temperatura ambiente. Desse modo, apenas os piezômetros cujos bulbos estão posicionados em regiões próximas à atmosfera serão mais influenciados pela variação da temperatura ambiente.

Pelo fato do valor da temperatura da água contida no piezômetro não estar disponível, foi considerada nesta análise o comportamento da temperatura da água do reservatório da usina hidrelétrica de Itaipu a uma profundidade de 80 metros (ITAIPU BINACIONAL, 2000-2002). Considerando-se esses dados, no período entre maio de 2000 e agosto de 2002, a temperatura da água mínima registrada foi de  $16,6^\circ\text{C}$  e a máxima registrada foi de  $26,9^\circ\text{C}$ . Desse modo, considerando-se esses valores de temperatura e a pressão atmosférica, a massa específica da água variou no intervalo entre  $1041,23 \text{ kg/m}^3$  e  $1037,77 \text{ kg/m}^3$ . Assim, considerou-se o valor da massa específica da água como uma distribuição retangular com o intervalo anteriormente citado.

### 6.2.8 *Comprimento do duto de medição*

$h_0$  (Comprimento total do duto de medição) =  $36,95 \pm 0,05 \text{ m}$  — De acordo com o apresentado na Seção 4.4, esta variável está relacionada com a influência do peso da coluna de ar comprimido presente no interior do duto

de medição. Conforme apresentado na Seção 2.3, considerando-se o intervalo de tempo entre 2004 e 2008, cerca de 95% dos piezômetros apresentaram comprimento máximo da altura não preenchida de até 34,87 metros<sup>4</sup>. Desse modo, sabendo-se que esse valor corresponde à condição com o menor nível d'água registrado no período considerado, para esta análise considerou-se a utilização de um duto de medição de 37,00 metros de comprimento. Ainda, sabe-se também que devido à flexibilidade do material, o duto de medição apresenta uma leve curvatura principalmente em sua extremidade inferior. Considerou-se então uma distribuição retangular em que o comprimento máximo do duto de medição poderia ser de 37,00 metros com uma incerteza expandida de  $\pm 50 \text{ mm}$ .

### 6.2.9 Diâmetro externo do duto de medição

$d_{duto}$  (Diâmetro externo do duto de medição) =  $6,0 \pm 0,1 \text{ mm}$  — Valores obtidos à partir de informações de fabricantes<sup>5</sup>.

### 6.2.10 Diâmetro interno do piezômetro

$D_{pz}$  (Diâmetro interno do piezômetro) =  $19,05 \pm 0,20 \text{ mm}$  — Valor equivalente ao diâmetro interno nominal declarado pelo fabricante (3/4"). A estimativa da incerteza foi obtida da Norma NBR-5680 que especifica as dimensões de dutos rígidos de PVC (ABNT, 1977).

### 6.2.11 Cota da extremidade inferior do duto de medição

$c_{fduto}$  (cota da extremidade inferior do duto de medição) =  $148,520 \pm 0,010$  — A análise realizada para a determinação da cota da extremidade inferior do duto de medição e de sua respectiva incerteza está apresentada na Seção 6.3.

A Tabela 8 apresenta o balanço de incertezas a medição de nível piezométrico considerando-se todas as variáveis envolvidas na medição. A nomenclatura dos símbolos e abreviações utilizada na Tabela 8 está listada abaixo.

- $U$  - Incerteza expandida da variável de entrada  $x_i$ ;
- $k$  - Fator de abrangência (coeficiente t de Student);

<sup>4</sup>Esse comprimento corresponde à maior distância entre a boca do piezômetro e o nível d'água em seu interior considerando-se o intervalo de tempo citado.

<sup>5</sup>[www.festo.com.br](http://www.festo.com.br)

- $u$  - Incerteza padrão da variável de entrada  $x_i$ , correspondente à razão entre  $U$  e  $k$ ;
- $c$  - Coeficiente de sensibilidade, correspondente à derivada parcial da função  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  em relação à variável de entrada  $x_i$ <sup>6</sup>;
- $u c$  - Produto entre a incerteza padrão da variável  $x_i$  e o coeficiente de sensibilidade em relação à mesma variável.
- $v$  - Número de graus de liberdade;
- % - Influência relativa da incerteza da variável na incerteza total (%).

Tabela 8: Balanço de incertezas para a medição de nível por borbulhamento

Variável	valor	u	c	u.c	v
$P_m$ [Pa]	47000	177	8,78E-05	0,0155	$\infty$
$P_{atm}$ [Pa]	98390	577,00	4,60E-08	0,0000	$\infty$
$T_m$ [K]	298	2,89	-1,79E-04	-0,0005	$\infty$
$T_{amb}$ [K]	298	1,73	1,06E-04	0,0002	$\infty$
$g$ [ $m/s^2$ ]	9,791	0,00057	-4,20E-01	-0,0002	$\infty$
$R$ [ $J/(kg K)$ ]	289,5	1,44	-7,52E-05	-0,0001	$\infty$
$h_0$ [m]	36,95	0,0289	4,66E-04	0,0000	$\infty$
$\rho_{H_2O}$ [ $kg/m^3$ ]	1040,48	0,999	-3,97E-03	-0,0040	$\infty$
$d_{duto}$ [m]	0,006	5,77E-05	-1,89E+02	-0,0109	$\infty$
$D_{pz}$ [m]	0,01905	1,15E-04	5,95E+01	0,0068	$\infty$
$c_{fduo}$ [m]	148,52	0,005	1,00E+00	0,0050	50
Incerteza padrão combinada				0,021	$\infty$
Inc. expandida [m]			<b>k=2</b>	<b>0,042</b>	

Adicionalmente, a Figura 24 apresenta um gráfico de colunas no qual pode ser observada a contribuição relativa de cada variável no resultado da medição, considerando-se os dados anteriormente citados.

Analisando-se a Figura 24 observa-se que, para o caso mais abrangente considerado neste trabalho (incerteza de medição igual a 42 mm), os principais fatores que contribuíram para a incerteza de medição correspondem ao valor e à incerteza da pressão medida pelo transmissor de pressão

<sup>6</sup>Os coeficientes de sensibilidade estão apresentados no Apêndice A



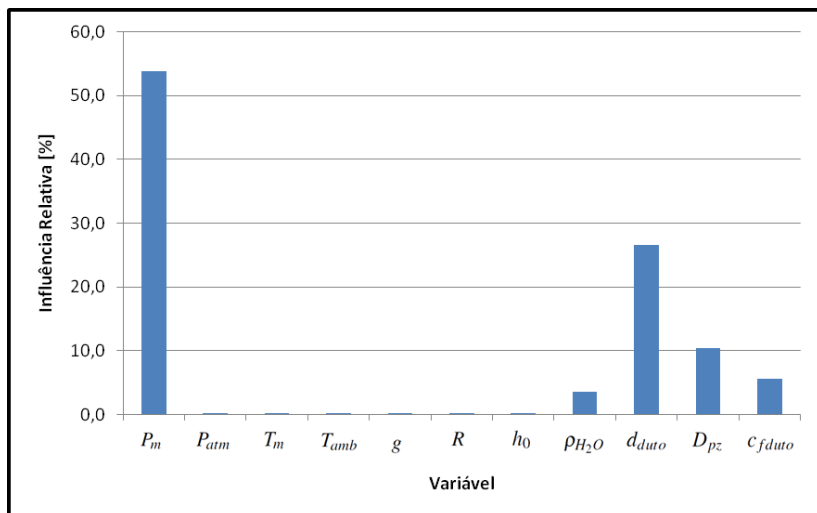


Figura 24: Gráfico de colunas com a contribuição relativa à cada fonte incerteza para o caso mais abrangente considerado neste trabalho

(53,7%), do diâmetro externo do duto de medição (26,6%), do diâmetro interno do piezômetro (10,5%) e da cota da extremidade inferior do duto de medição (5,6%).

### 6.2.12 Procedimentos para redução da incerteza de medição

De acordo com o exposto na Seção 3, a incerteza de medição máxima desejada e aceitável para a medição de níveis piezométricos é de 20 mm. Assim sendo, considerando-se a avaliação teórica apresentada anteriormente, alguns procedimentos podem ser realizados com o intuito de reduzir a incerteza de medição. Nesse sentido, a seguir são apresentados e discutidos os principais fatores que podem ser tratados.

#### 6.2.12.1 Classe de exatidão do transmissor de pressão

A incerteza de medição associada ao transmissor de pressão utilizado neste trabalho foi de 0,51% da faixa medição do mesmo. Esse valor foi obtido a partir da combinação das seguintes fontes: incerteza declarada do transmissor de pressão (0,25% da faixa de medição), deriva térmica (0,4% da faixa de

medição) e deriva temporal considerando-se o período de um ano (0,2% da faixa de medição). Contudo, pode-se utilizar, por exemplo, um transmissor de pressão com características metrológicas que resultem em uma incerteza na ordem de 0,15% da faixa de medição<sup>7</sup>, considerando-se as mesmas fontes anteriormente citadas.

#### **6.2.12.2 Diâmetro externo do duto de medição**

Reduzindo-se as dimensões do duto de medição, reduz-se também a quantidade de líquido que deve ser expulsa de seu interior para que ocorra o borbulhamento. Consequentemente, a incerteza associada à presença do duto de medição também é reduzida por meio da utilização de duto de medição com menor diâmetro externo.

Assim, utilizando-se, por exemplo, um duto de medição similar ao utilizado neste trabalho porém com diâmetro externo de 4 milímetros<sup>8</sup> em conjunto com um transmissor de pressão de melhor qualidade, poderia-se reduzir a incerteza de medição para um nível da ordem de grandeza desejada para a aplicação.

#### **6.2.12.3 Estimativa da cota da extremidade inferior do duto de medição**

Na Seção 6.3 é apresentada uma proposta de procedimento para que a cota da extremidade inferior do duto de medição possa ser estimada. Nessa análise, a incerteza expandida da estimativa é de aproximadamente 10 milímetros. Desse modo, pode-se trabalhar com o intuito de desenvolver um procedimento para a determinação dessa variável com menor incerteza.

#### **6.2.12.4 Coluna d'água a ser medida**

A incerteza de medição está diretamente relacionada com a altura de coluna d'água a ser medida pois, de acordo com a *Lei da Propagação da Incerteza*, quanto menor a pressão estabelecida no transmissor de pressão, reduz-se também o valor do coeficiente de sensibilidade associado a essa variável ( $P_m$ ). Consequentemente, menor é a participação da incerteza associada a essa variável na incerteza de medição resultante.

Nesse sentido, avaliando-se, individualmente, o comportamento do nível d'água no interior de cada piezômetro, pode-se introduzir o duto de

---

<sup>7</sup><http://www.gesensinginspection.com/>

<sup>8</sup>Especificação disponível no mercado.

medição com o intuito de que o seu comprimento submerso seja, em função do piezômetro, de aproximadamente 1 ou 2 metros e não de 4 metros conforme considerado na avaliação realizada neste trabalho.

Assim sendo, de acordo com as considerações realizadas neste trabalho, a incerteza de medição desejada para a aplicação (menor de 20 mm) poderá ser obtida por meio da adequação dos equipamentos utilizados. Ainda, considerando-se em conjunto todas as alternativas citadas neste trabalho para redução da incerteza de medição, a componente aleatória do resultado da medição de nível por borbulhamento poderá ser inferior à desejada. Cabe ainda ressaltar que seria necessária uma análise mais detalhada do ponto de vista “custo-benefício” a respeito da viabilidade da implantação de cada alternativa para a redução da incerteza de medição.

### 6.3 Determinação da cota da extremidade inferior do duto de medição

Para facilitar a interpretação dos resultados nas medições de níveis piezométricos e para preservar a compatibilidade com os registros históricos existentes, as indicações dos resultados das medições devem ser expressas em relação a um mesmo referencial. No caso da usina hidrelétrica de Itaipu, atualmente o resultado da medição dos níveis piezométricos é expresso em relação a um referencial adotado inicialmente que corresponde ao nível do mar<sup>9</sup>.

Desse modo, para o caso da medição de nível por borbulhamento, estimando-se a cota da extremidade inferior do duto de medição ( $ct_{fduto}$ ) em relação ao mesmo referencial da cota da “boca” do piezômetro, pode-se determinar a cota do nível d’água em relação ao referencial já estabelecido. A pressão de borbulhamento está relacionada apenas com a altura de coluna d’água ( $h_{real}$ ) presente acima da extremidade inferior do duto de medição, sendo que desse modo, adicionando-se ao valor da cota da extremidade inferior do duto de medição o valor medido da altura da coluna d’água, obtém-se o resultado da medição conforme apresentado anteriormente na Equação 4.15.

$$ct_{nível} = ct_{fduto} + h_{real}$$

A solução proposta neste trabalho para a obtenção da cota da extremidade inferior do duto de medição consiste na utilização de dutos de medição que apresentem uma escala graduada, na sua região externa, em toda extensão

<sup>9</sup>Quando os piezômetros foram instalados, a cota da “boca” e a cota de instalação do bulbo de cada piezômetro foram medidos, em relação ao nível do mar, por meio de topografia.

ou apenas na região de interesse<sup>10</sup>.

Duas abordagens podem ser utilizadas para estimar o valor de  $ct_{fduto}$ :

1. A partir da análise dos dados históricos do comportamento do nível d'água, em relação à cota da boca, no interior de cada piezômetro, determina-se o comprimento do duto de medição necessário para cada piezômetro de modo a garantir que a sua extremidade inferior permaneça submersa. Desse modo o valor de  $ct_{fduto}$  é obtido subtraindo-se do valor da cota da boca do referido piezômetro o valor do comprimento do duto de medição utilizado;
2. A segunda abordagem consiste em utilizar, apenas no momento da instalação do equipamento, o duto de medição de modo semelhante ao conjunto “cabo e pio elétrico”. Para isso, deverá ocorrer a vazão de ar comprimido durante a inserção do duto de medição e, monitorando-se a pressão no interior do duto de medição, a cota da superfície d'água poderá ser estimada. A partir dessa posição, de acordo com análise prévia do comportamento do nível d'água em cada piezômetro, o duto de medição deverá ser adicionalmente inserido com o intuito de garantir que a extremidade inferior do duto de medição permaneça submersa. A principal vantagem desta abordagem consiste na possibilidade da realização de verificação, pois o valor da cota do nível d'água indicado pela medição de acordo com o princípio de borbulhamento poderá ser confrontado com o valor indicado pela medição realizada inicialmente utilizando-se o duto de medição de modo semelhante ao conjunto “cabo e pio elétrico”.

A priori, seria mais adequado utilizar-se dutos rígidos com o intuito de que os mesmos não se deformassem conforme são inseridos no interior do piezômetro. No entanto, a utilização de dutos de medição rígidos apresentaria desvantagens devido a necessidade de, em muitos casos, extensos comprimentos como por exemplo acima de 10 metros (Figura 13). Nesses casos tornaria-se necessária a realização de soldas ou outro tipo de união para que o prolongamento do duto de medição pudesse ser efetuado.

Sob esse ponto de vista, a utilização de dutos de medição de material flexível, tal como poliuretano ou material similar, seria mais adequada pois

---

<sup>10</sup>Devido ao fato de conhecer-se previamente a cota da “boca” e o comportamento do nível d'água no interior de cada piezômetro, o comprimento do duto de medição necessário para cada piezômetro poderá ser estimando antecipadamente. Desse modo, caso seja conveniente, apenas a região do duto de medição que ficará próxima a cota da boca poderá conter as marcações da escala.

essas mangueiras, além de não apresentarem significativa deformação radial, são vendidas no mercado em formato de rolos com grandes comprimentos dispensando assim a necessidade de uniões intermediárias. Ainda, sabendo-se que o diâmetro interno do piezômetro é de aproximadamente 19 milímetros e utilizando-se um duto de medição com diâmetro externo de 6 milímetros, conforme utilizado neste trabalho, observa-se que o próprio piezômetro tende a restringir e direcionar o posicionamento do duto de medição.

Contudo, principalmente devido a propensão do duto de medição apresentar-se levemente curvado em sua região próxima a extremidade inferior (Figura 25), o valor da cota da extremidade inferior do duto de medição utilizado nos cálculos não será exato. Existirá um erro sistemático, que estará presente em todas as medições, devido ao valor real da cota da extremidade inferior do duto de medição ser levemente superior ao valor considerado nos cálculos.

Vale-se considerar que o principal interesse na medição de níveis piezométricos consiste em medir a variação relativa do nível d'água em seu interior. Ou seja, mesmo existindo um pequeno erro sistemático, o qual permanecerá constante em todas as medições, não haverá revezes significativos pois as variações relativas estarão sendo medidas corretamente. Torna-se importante também considerar nesse contexto que a própria medição da cota da boca e da cota de instalação do bulbo de cada piezômetro, realizada por meio de topografia, não apresenta avaliação da incerteza de medição.

Após o posicionamento do duto de medição, o qual permanecerá fixo no interior do piezômetro, a cota da extremidade inferior do mesmo permanecerá praticamente inalterada. Desse modo, para a análise de incerteza realizada neste trabalho considerou-se que estimativa de  $ct_{fduo}$  apresenta apenas um erro de característica aleatória de 10 milímetros pois, o erro sistemático presente não afetará significativamente na interpretação dos resultados das medições.

## 6.4 Avaliação experimental

Conforme já apresentado, diversas variáveis estão envolvidas na medição de nível por borbulhamento. A influência de grande parte dessas variáveis no resultado da medição pôde ser analisada na avaliação teórica da incerteza de medição apresentada na Seção 6.2. No entanto, torna-se também importante a realização de uma avaliação experimental. Por meio dessa avaliação, os dados previstos na avaliação teórica podem ser confrontados com valores reais.

Nesse contexto, utilizando-se o protótipo e a bancada desenvolvidos neste trabalho, foram realizados experimentos com o objetivo de avaliar a influência da vazão de ar comprimido nos resultados das medições e, adicionalmente, foi realizada uma calibração do protótipo do sistema de medição desenvolvido.

#### 6.4.1 *Influência da vazão de ar comprimido*

A vazão de ar comprimido corresponde a uma importante variável e que não é considerada no equacionamento utilizado neste trabalho para a medição dos níveis piezométricos. A vazão do gás utilizado está diretamente relacionada com a tempo necessário para a realização das medições e com o aproveitamento adequado do gás evitando-se assim desperdícios.

Conforme apresentado na Seção 5.4.2.1, foram realizados experimentos com intuito de avaliar a influência da vazão de ar comprimido no resultado da medição. A Figura 25 ilustra os três tipos de borbulhamento considerados. O borbulhamento suave foi caracterizado por uma vazão baixa (aproximadamente 50 ml/min<sup>11</sup>), que resultou na liberação de uma a duas bolhas por segundo. O borbulhamento médio foi originado por uma vazão de aproximadamente 75 ml/min e liberação de três a cinco bolhas por segundo. Por último, para o borbulhamento violento foi utilizado uma vazão alta (aproximadamente 150 ml/min) o que dificultou a identificação e contagem das bolhas.

A Tabela 9 apresenta a indicação “padrão” do nível (*ctpad*) e a média e o desvio padrão dos resultados das três medições, em cada ponto, com borbulhamento suave (*mdsua* e *dpsua*), borbulhamento médio (*mdmed* e *dpmed*) e borbulhamento violento (*mdvio* e *dpvio*).

Adicionalmente, a Figura 26 apresenta a curva de erros para os três tipos de borbulhamento.

Como pode ser observado na Figura 26 e na Tabela 9, os erros (sistemáticos e aleatórios) tendem a ser mais significativos nos casos com borbulhamento violento.

Assim, além do ponto de vista econômico, a utilização de uma vazão adequada de ar comprimido é de grande importância para a garantia da confiabilidade dos resultados das medições. Como pôde ser observado nos resultados, a utilização de vazões elevadas de ar comprimido resultaria em um borbulhamento violento e, conseqüentemente, medições errôneas. Além desse

---

<sup>11</sup>Os valores de vazão não foram medidos. Correspondem a uma estimativa à partir dos dados fornecidos pelo fabricante.



Figura 25: Representação dos tipos de borbulhamento obtidos. Borbulhamento suave (à esquerda), borbulhamento médio (ao centro) e borbulhamento violento (à direita)

Tabela 9: Resultados das medições com o três tipos de borbulhamento

<b>ctpad</b> [m]	<b>mdsua</b> [m]	<b>dpsua</b> [mm]	<b>mdmed</b> [m]	<b>dpmed</b> [mm]	<b>mdvio</b> [m]	<b>dpvio</b> [mm]
0,591	0,591	0,0	0,591	0,6	0,593	1,2
0,726	0,726	0,0	0,726	0,6	0,726	1,2
0,810	0,811	0,0	0,811	0,6	0,811	0,6
0,940	0,940	0,6	0,940	0,6	0,935	1,2
1,028	1,030	0,6	1,026	0,6	1,022	1,5
1,139	1,138	0,6	1,138	0,0	1,129	1,2
1,232	1,231	0,6	1,230	1,0	1,218	2,0
1,305	1,304	0,0	1,303	1,2	1,293	4,0

fato, no caso de um equipamento portátil, favoreceria também o esgotamento acelerado do conteúdo do reservatório de ar comprimido. Por outro lado, uma vazão extremamente baixa de ar comprimido faria com que a duração da medição fosse demorada, devido ao retardo no tempo necessário para que ocorra o borbulhamento. Desse modo, principalmente nos casos com alturas de coluna d'água (acima da extremidade inferior do duto de medição) superiores a, aproximadamente, 1 metro, pode ser útil a utilização de um controle da vazão de ar comprimido com o intuito de proporcionar vazão elevada nos

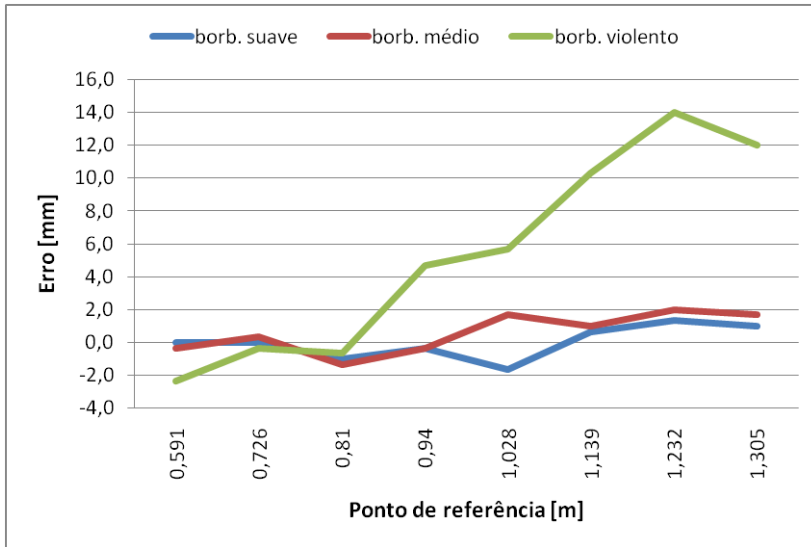


Figura 26: Curva de erros para os três tipos de borbulhamento

instantes iniciais da medição e, a partir do início do borbulhamento, vazão reduzida que resulte em um borbulhamento suave.

Ainda, devido à baixa massa específica do ar comprimido e à baixa velocidade de escoamento do ar no interior do duto de medição, nos experimentos não foram observados efeitos significativos da perda de carga.

#### 6.4.2 Calibração do sistema de medição

De acordo com o *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição* (BIPM; IEC; IFCC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML, 2003), um modo de decidir se um sistema de medição está funcionando adequadamente consiste em comparar o desvio padrão previsto, obtido pela combinação dos vários componentes de incerteza que caracterizam a medição, com a variabilidade observada experimentalmente de seus valores de saída, conforme medida pelo seu desvio padrão observado. Nesse contexto, a seguir são apresentados e discutidos os resultados da calibração realizada neste trabalho.

Os procedimentos utilizados para a calibração foram apresentados na Seção 5.4.2. A Tabela 10 apresenta o resultado da calibração. Para cada ponto calibrado, do ciclo ascendente e do ciclo descendente, é apresentada



a sua devida correção, a incerteza expandida, o fator de abrangência ( $k$ ) e o número de graus de liberdade efetivo ( $\nu$ ).

Tabela 10: Resultado da calibração

Valor de Referência (m)	Correção (m)	Incerteza (m)	k	$\nu$
0,422	0,000	0,003	2,00	$\infty$
0,501	-0,001	0,004	2,52	6
0,600	0,000	0,003	2,00	$\infty$
0,700	0,000	0,004	2,37	8
0,801	-0,001	0,003	2,07	36
0,900	0,000	0,004	2,52	6
1,100	0,000	0,004	2,52	6
1,300	0,000	0,004	2,37	8
1,500	0,000	0,004	2,37	8
1,600	0,000	0,003	2,07	36
1,599	0,001	0,003	2,07	36
1,500	0,000	0,003	2,07	36
1,300	0,000	0,004	2,52	6
1,100	0,000	0,004	2,37	8
0,900	0,000	0,004	2,52	6
0,800	0,000	0,004	2,37	8
0,700	0,000	0,004	2,37	8
0,600	0,000	0,004	2,52	6
0,501	-0,001	0,003	2,07	36
0,422	0,000	0,004	2,52	6

Na Tabela 11 está apresentado o balanço de incertezas para o ponto com erro máximo encontrado na calibração, correspondente a 5 milímetros<sup>12</sup>.

Como pôde ser observado na Tabela 11, para a avaliação da incerteza na calibração foram consideradas as seguintes fontes de incerteza: a repetitividade das medições, a resolução do indicador do protótipo (1 milímetro) e a incerteza na medição do padrão de nível<sup>13</sup> (2 milímetros).

<sup>12</sup>O erro máximo de 5 milímetros foi encontrado na calibração do ponto 0,501 m do ciclo ascendente.

<sup>13</sup>Para a estimativa da incerteza na medição do padrão de nível foi considerada, respectivamente, a incerteza na medição da cota do nível d'água e a incerteza na medição da cota da extremidade inferior do duto de medição.

Tabela 11: Balanço de incertezas para o ponto 0,501 m do ciclo ascendente

Fonte	U	k	u	v	pareto
Repetitividade	0,0012	1	0,0012	2	55,17 %
Resolução	0,0005	1,73	0,0003	inf	3,45 %
Medição do Padrão	0,002	2,00	0,001	inf	41,38 %
inc. padrão combinada [m]			0,0016	$v_{ef} = 6$	100 %
inc. expandida [m]		<b>k=2,52</b>	<b>0,004</b>		

De um modo geral, o fator mais significativo que contribuiu na incerteza da calibração de todos os pontos foi a própria incerteza na medição do padrão de nível. Esse fato se deve, principalmente, ao efeito da ângulo de contato entre a água e a parede da mangueira transparente, que tende tornar o menisco côncavo e à refração, que tende a dificultar a leitura da cota da extremidade inferior do duto de medição. Os procedimentos utilizados para a realização da leitura do padrão de nível foram apresentados na Seção 5.3.2.

Na calibração dos pontos que apresentaram repetitividade abaixo de 0,6 mm, o fator predominante para o valor da incerteza correspondeu à incerteza na medição do padrão. Já na calibração dos pontos que apresentaram repetitividade significativa, como por exemplo o ponto apresentado na Tabela 11, as contribuições relativas da repetitividade e da incerteza na medição do padrão foram semelhantes. Destaca-se ainda que a repetitividade apresentada nos resultados pode ter sido ocasionada devido às dificuldades observadas no ajuste e na leitura do padrão, conforme os motivos citados anteriormente.

As Figuras 27 e 28 apresentam, respectivamente, a curva de erros para a calibração no ciclo ascendente e descendente.

Assim, conforme os dados apresentados neste trabalho, considerando-se uma variação de nível d'água de aproximadamente 1,2 metros, o erro máximo observado na calibração foi de 5 milímetros, sendo que, um fator significativo para tal valor correspondeu à incerteza na medição do padrão de nível.

Ainda, com a realização dos experimentos observou-se que as dimensões do chanfro localizado na extremidade inferior do duto de medição, além de possuir a função de direcionar o borbulhamento, tem grande influência nos resultados das medições. Observou-se que, para a medição correta da altura da coluna d'água presente acima da extremidade inferior do duto de medição, a superfície inferior das bolhas originadas devem coincidir com a cota da região não chanfrada da extremidade inferior do duto de

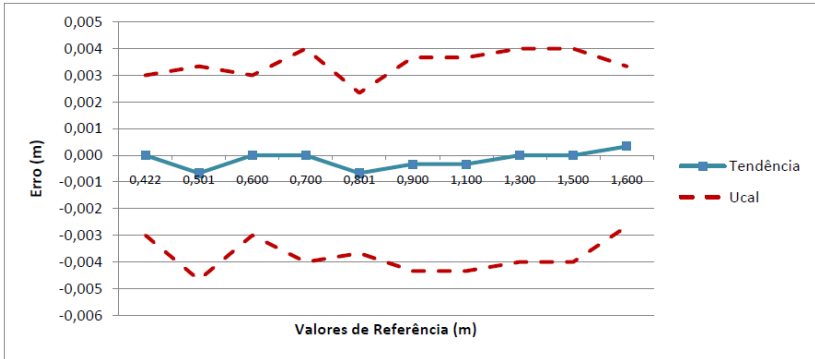


Figura 27: Curva de erros - calibração (ciclo ascendente)

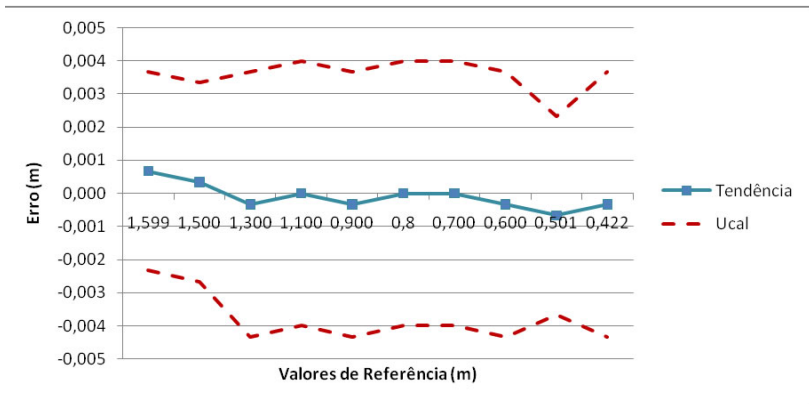


Figura 28: Curva de erros - calibração (ciclo descendente)

medição. Em outras palavras, a pressão de borbulhamento está relacionada com as dimensões das bolhas originadas e, conseqüentemente, com a cota da superfície inferior das mesmas.

A interação entre líquidos e gases já é objeto de estudo em diversas situações pois consiste em uma das mais importantes, e frequentemente utilizadas, operações na indústria química, petroquímica, de processamento mineral, entre outras (KULKARNI; JOSHI, 2005). Em grande parte desses casos, a interação entre as duas fases ocorre por meio do borbulhamento do gás

dentro da “piscina” de líquido. O processo de formação das bolhas é complexo e determinado por diversos parâmetros, entre os quais a vazão do gás, condição do líquido (estático ou em movimento), tipo de ligação química entre as moléculas do líquido (polar ou apolar), viscosidade e densidade do líquido (PIASSI, 2007). No entanto, a dinâmica da formação das bolhas não foi objeto de estudo neste trabalho, acreditando-se que os principais fatores a serem considerados correspondam à ocorrência de borbulhamento com característica suave e ao dimensionamento correto do chanfro.

## **6.5 Considerações finais**

De acordo com as análises realizadas neste trabalho, o princípio de medição de nível por borbulhamento se apresentou como uma viável alternativa para a medição de níveis piezométricos. Do ponto de vista metrológico, de acordo com os resultados apresentados, a incerteza de medição obtida por meio da utilização do princípio de medição pode ser compatível com a inicialmente especificada para aplicação.

Visando a utilização em campo, ou ainda a fabricação para comercialização, de um sistema de medição de níveis piezométricos baseado no princípio proposto neste trabalho, deve-se ainda procurar informações de componentes com o intuito de tornar o sistema portátil de modo que apenas o duto de medição permaneça fixo no interior dos piezômetros. Nesse contexto, fatores importantes a serem considerados correspondem à alimentação elétrica e especificações dos componentes elétricos e à especificação de um suprimento de ar comprimido conveniente. Os componentes do sistema de medição poderão ainda estar posicionados em uma espécie de mochila, facilitando assim o seu transporte por parte dos operadores.

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 Conclusões

Com o desenvolvimento tecnológico, cada vez mais aumenta o número de princípios e de sistemas de medições aplicáveis para a medição de um mesmo mensurando. A escolha de um sistema de medição para determinada função requer uma análise criteriosa e demanda um certo investimento inicial e avaliações, por exemplo, do ponto de vista técnico, operacional, logístico, econômico, da confiabilidade metrológica, da manutenibilidade, entre outros (ALBERTAZZI Jr.; SOUZA, 2008).

Nesse contexto, este trabalho teve o objetivo específico de, à partir da análise prévia de diversos princípios de medição de nível, avaliar, principalmente do ponto de vista metrológico, a aplicabilidade do princípio de medição de nível por borbulhamento para a medição de níveis piezométricos.

Além disso, realizou-se também um mapeamento das características dos piezômetros instalados na fundação da usina hidrelétrica de Itaipu e do comportamento histórico do nível d'água no interior desses instrumentos com o intuito de auxiliar no dimensionamento do sistema de medição a ser desenvolvido e em eventuais posteriores estudos.

Durante a realização do trabalho foi realizada uma avaliação teórica e uma experimental com o intuito de quantificar a incerteza de medição relacionada com a utilização do citado princípio de medição para a referida finalidade.

Por meio da avaliação teórica mostrou-se que, considerando-se os dados dos equipamentos utilizados neste trabalho e informações abrangentes acerca do comportamento da grandeza a ser medida e das variáveis de influência, a incerteza de medição associada à medição de nível por borbulhamento seria de 42 milímetros. Entretanto, mostrou-se também que a incerteza de medição desejada para a aplicação pode ser obtida, por exemplo, por meio da adequação de certos componentes do sistema de medição como o transmissor de pressão e o duto de medição.

De acordo com a avaliação teórica foram identificados os principais fatores que contribuíram para a incerteza de medição, sendo eles: a incerteza associada ao transmissor de pressão, o diâmetro externo do duto de medição e a incerteza da estimativa da cota da extremidade inferior do duto de medição. Além disso, foram também identificadas as variáveis relacionadas com a medição que não influenciam de modo significativo na incerteza de medição. Dentre essas variáveis, podem-se citar: pressão atmosférica, tem-

peratura ambiente e do ar de medição, massa específica da água contida no interior do duto de medição, aceleração da gravidade, constante de gás ( $R$ ) e comprimento do duto de medição<sup>1</sup>.

Com relação a avaliação experimental, foi desenvolvido um protótipo para avaliação do princípio de medição de nível por borbulhamento em condições semelhantes a dos piezômetros. Os experimentos foram realizados em bancada tendo-se em vista a necessidade de um “padrão” de nível, que permitisse a comparação entre os valores indicados pelo sistema de medição e o “valor verdadeiro” do mensurando. Além desse fato, nesta etapa de avaliação, foi importante que se pudesse variar o nível d’água para que o comportamento do protótipo pudesse ser avaliado de um modo mais abrangente.

Assim sendo, a avaliação experimental foi subdividida em duas etapas: na primeira foi realizada uma calibração do protótipo do sistema de medição proposto e na segunda foi realizada uma avaliação da influência da vazão de ar comprimido no resultado da medição.

Na calibração realizada mostrou-se que, em condições controladas, o erro máximo observado foi de 5 milímetros, ou seja, foi possível atingir um desempenho melhor do que o previsto na avaliação teórica. Ainda que este resultado seja esperado, devido ao fato de que apenas uma parcela das fontes de incerteza tenha atuado nos experimentos, há indícios de que os níveis previstos na avaliação teórica podem ser atingidos em condições reais de utilização e, conseqüentemente, de que o princípio de medição de nível por borbulhamento pode representar uma alternativa viável para medições de níveis piezométricos.

Adicionalmente, foram também realizados experimentos com o intuito de avaliar a influência da vazão de ar comprimido no resultado da medição. Mostrou-se que vazões baixas, de aproximadamente 50 mililitros por minuto, apresentam melhores resultados tanto sob o ponto de vista de erros sistemáticos quanto de erros aleatórios. Além desse fato, vazões baixas são também vantajosas do ponto de vista de economia de ar comprimido pois resultam em maior autonomia dos reservatórios. A título de exemplo, já existem no mercado cilindros de ar comprimido portáteis com capacidade volumétrica e de pressão suficientes para utilização em diversas medições consecutivas<sup>2</sup>.

Contudo, cabe-se ainda ressaltar que este trabalho apresentou uma

---

<sup>1</sup> Diante da baixa influência dessas variáveis na incerteza de medição, se estimadas adequadamente, não será necessário que essas variáveis sejam medidas no instante da realização das medições de nível.

<sup>2</sup> [www.ibrbrasil.ind.br](http://www.ibrbrasil.ind.br)

abordagem inicial a respeito da utilização da pressão de borbulhamento para a medição de níveis piezométricos. Diversas variáveis foram consideradas nesta avaliação porém outras mais podem vir a se tornar significativas após a realização de estudos complementares. Assim sendo, esses estudos são de grande importância e devem ser realizados com o intuito de que um sistema de medição baseado na pressão de borbulhamento possa ser utilizado no dia-a-dia pelos operadores.

## **7.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Com a realização deste trabalho foram identificados alguns tópicos que podem ser abordados em trabalhos futuros com o intuito de complementar este trabalho e auxiliar na concepção de um equipamento que possa ser utilizado no dia a dia pelos operadores.

A seguir esses tópicos estão listados:

1. avaliar experimentalmente a aplicabilidade do princípio de medição em piezômetros com comprimentos maiores e em piezômetros inclinados;
2. pesquisar equipamentos que tornem o conjunto funcional do ponto de vista de portabilidade e autonomia para a realização de diversas medições consecutivas;
3. realizar estudo confrontando os dados medidos com o sistema de medição baseado na pressão de borbulhamento com os dados medidos com o sistema de medição utilizado atualmente;
4. pesquisar alternativas para integrar a coleta e o registro de dados das leituras na base de dados correspondente.





## APÊNDICE A – COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE

Equação de medição:

$$ct_{nível} = ct_{fduto} + \left( \left( \frac{P_m + \frac{(P_{atm} + P_m) h_0 g}{RT_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{RT_{amb}}}{\rho_{H_2O} g - \frac{P_{atm} g}{RT_{amb}}} \right) \left( 1 - \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} \right) \right) \quad (A.1)$$

Coefficientes de sensibilidade:

$$\frac{\partial ct_{nível}}{\partial ct_{fduto}} = 1 \quad (A.2)$$

$$\frac{\partial ct_{nível}}{\partial P_m} = - \frac{\left( \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1 \right) \left( \frac{g h_0}{RT_m} + 1 \right)}{g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{RT_{amb}}} \quad (A.3)$$

$$\frac{\partial ct_{nível}}{\partial P_{atm}} = \frac{\left( \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1 \right) \left( \frac{g h_0}{RT_{amb}} - \frac{g h_0}{RT_m} \right)}{g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{RT_{amb}}} - \frac{g \left( \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1 \right) \left( P_m + \frac{g h_0 (P_{atm} + P_m)}{RT_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{RT_{amb}} \right)}{RT_{amb} \left( g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{RT_{amb}} \right)^2} \quad (A.4)$$

$$\frac{\partial ct_{nível}}{\partial h_0} = - \frac{\left( \frac{g (P_{atm} + P_m)}{RT_m} - \frac{P_{atm} g}{RT_{amb}} \right) \left( \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1 \right)}{g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{RT_{amb}}} \quad (A.5)$$

$$\frac{\partial ct_{nível}}{\partial g} = \frac{\left( \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1 \right) \left( \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm}}{RT_{amb}} \right) \left( P_m + \frac{g h_0 (P_{atm} + P_m)}{RT_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{RT_{amb}} \right)}{\left( g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{RT_{amb}} \right)^2} - \frac{\left( \frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1 \right) \left( \frac{h_0 (P_{atm} + P_m)}{RT_m} - \frac{P_{atm} h_0}{RT_{amb}} \right)}{g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{RT_{amb}}} \quad (A.6)$$

$$\frac{\partial ct_{nível}}{\partial R} = \frac{\left(\frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1\right) \left(\frac{g h_0 (P_{atm} + P_m)}{R^2 T_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{R^2 T_{amb}}\right)}{g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{R T_{amb}}} + \frac{P_{atm} g \left(\frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1\right) \left(P_m + \frac{g h_0 (P_{atm} + P_m)}{R T_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{R T_{amb}}\right)}{R^2 T_{amb} \left(g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{R T_{amb}}\right)^2} \quad (A.7)$$

$$\frac{\partial ct_{nível}}{\partial T_m} = \frac{g h_0 (P_{atm} + P_m) \left(\frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1\right)}{R T_m^2 \left(g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{R T_{amb}}\right)} \quad (A.8)$$

$$\frac{\partial ct_{nível}}{\partial T_{amb}} = \frac{P_{atm} g \left(\frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1\right) \left(P_m + \frac{g h_0 (P_{atm} + P_m)}{R T_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{R T_{amb}}\right)}{R T_{amb}^2 \left(g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{R T_{amb}}\right)^2} - \frac{P_{atm} g h_0 \left(\frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1\right)}{R T_{amb}^2 \left(g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{R T_{amb}}\right)} \quad (A.9)$$

$$\frac{\partial ct_{nível}}{\partial \rho_{H_2O}} = \frac{g \left(\frac{d_{duto}^2}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} - 1\right) \left(P_m + \frac{g h_0 (P_{atm} + P_m)}{R T_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{R T_{amb}}\right)}{\left(g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{R T_{amb}}\right)} \quad (A.10)$$

$$\frac{\partial ct_{nível}}{\partial d_{duto}} = - \frac{\left(\frac{2 d_{duto}}{D_{pz}^2 - d_{duto}^2} + \frac{2 d_{duto}^3}{(D_{pz}^2 - d_{duto}^2)^2}\right) \left(P_m + \frac{g h_0 (P_{atm} + P_m)}{R T_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{R T_{amb}}\right)}{g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{R T_{amb}}} \quad (A.11)$$

$$\frac{\partial ct_{nível}}{\partial D_{pz}} = \frac{2 D_{pz} d_{duto}^2 \left(P_m + \frac{g h_0 (P_{atm} + P_m)}{R T_m} - \frac{P_{atm} g h_0}{R T_{amb}}\right)}{\left(g \rho_{H_2O} - \frac{P_{atm} g}{R T_{amb}}\right) (D_{pz}^2 - d_{duto}^2)^2} \quad (A.12)$$

**ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TRANSMISSOR  
DE PRESSÃO**



Laboratório de  
**FORÇA, PRESSÃO E MASSA**  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



## Certificado de Calibração

Data da Calibração: 28/01/10

Data da Emissão: 29/01/10

n. 0293/10

Página: 1 de 2

1. CONTRATANTE: FUNDAÇÃO CENTROS DE REFERÊNCIA EM TECNOLOGIAS INOVADORAS  
Campus da UFSC, S/N - Florianópolis - SC

2. SOLICITANTE: O mesmo

3. MANÔMETRO DIGITAL CALIBRADO [SMC]

n. Série (fabricante): Não consta  
n. Identificação (solicitante): 009707  
Faixa de Indicação: 0 a 60 kPa  
Incremento Digital: 0,01 kPa

4. SÍNTESE DESTA CALIBRAÇÃO:

Conforme procedimentos internos, a maior incerteza de medição encontrada, considerando que seja efetuada a respectiva correção, é de 0,04 kPa.

5. PADRÃO UTILIZADO (SMP):  
5.1. Máquina Padrão Digital de Pressão  
n. Registro (CERTI): RC 2028

U : 0,0003 bar

Rastreabilidade: Certificado de Calibração INMETRO no SMP. Foram realizados 3 ciclos de medição com (Duque de Caxias) DIMCI 1285/2005 , de 14/07/05, válido histerese.

6. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:

PC-198

O manômetro digital calibrado foi montado no SMP, onde foram gerados os valores de pressão previamente estabelecidos, referenciados no manômetro digital e lidos no SMP. Foram realizados 3 ciclos de medição com

Observações:

Correção = - (Indicação no SMC - Média das Indicações no SMP).

O valor da correção deverá sempre ser somado algebricamente à indicação do SMC.

Condições Ambientais Durante a Calibração:

Temperatura: 21 +/- 1 °C ; Umidade Relativa do Ar: 50 +/- 10 % ; Pressão atmosférica: 1020 +/- 30 hPa

1 kPa = 1 kPa (kPa - Unidade do S.I.)

Os valores de conversão de unidades foram utilizados obedecendo as seguintes condições:

$g_m = 9,80665 \text{ m/s}^2$        $\rho_{H_2O} [4^\circ\text{C}] = 1,000\,000 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$        $P_{atm} = 1013,25 \text{ hPa}$        $\rho_{H_g} [0^\circ\text{C}] = 1,359\,508 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^3$

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Copre-Inmetro, que avalia a competência do laboratório e comprova sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Copre-Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo de IAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao equipamento submetido a calibração, nas condições especificadas, não sendo estendidos a quaisquer outros. Esta calibração não envolve o instrumento de controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

RBC 01

Campus da Universidade Federal de  
Santa Catarina - UFSC

Setor C  
CEP: 88040-970  
Florianópolis - SC  
Caixa Postal 5053

Tel: +48 3239 2121  
Fax: +48 3239 2119  
metrologia@certi.org.br  
www.certi.org.br

Fundação CERTI  
CNPJ 78.626.363/0001-24  
Insc. Est. 251.378.241  
Insc. Mun. 50.111-5



Laboratório de  
**FORÇA, PRESSÃO E MASSA**  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



# Certificado de Calibração

Data da Calibração: 28/01/10

Data da Emissão: 29/01/10

n. 0293/10


7. RESULTADOS:

Página: 2 de 2

TABELA DE RESULTADOS

INDICAÇÕES NO SMC		MÉDIA DAS INDIC. NO	CORREÇÃO	U	HISTERESE	Fator de Abrangência	Graus de Liberdade
[kPa]	[kPa]	SMP [kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	k	ν <sub>eff</sub>
0,15	0,15	0,00	-0,15	0,04	*****	2,00	Infinito
5,00	5,00	4,86	-0,14	0,04	*****	2,03	98
15,00	15,00	14,85	-0,15	0,04	*****	2,03	98
25,00	25,00	24,85	-0,15	0,04	*****	2,03	98
30,00	30,00	29,83	-0,17	0,04	*****	2,00	Infinito
35,00	35,00	34,82	-0,18	0,04	*****	2,00	Infinito
45,00	45,00	44,82	-0,18	0,04	*****	2,03	98
50,00	50,00	49,82	-0,18	0,04	*****	2,00	Infinito
60,00	60,00	59,81	-0,19	0,04	*****	2,03	98
60,00	60,00	59,81	-0,19	0,04	0,00	2,03	98
50,00	50,00	49,81	-0,19	0,04	0,00	2,03	98
45,00	45,00	44,81	-0,19	0,04	0,00	2,00	Infinito
35,00	35,00	34,81	-0,19	0,04	0,00	2,03	98
30,00	30,00	29,82	-0,18	0,04	0,00	2,03	98
25,00	25,00	24,82	-0,18	0,04	0,00	2,00	Infinito
15,00	15,00	14,84	-0,16	0,04	0,00	2,00	Infinito
5,00	5,00	4,84	-0,16	0,04	0,00	2,03	98
0,15	0,15	0,00	-0,15	0,04	0,00	2,00	Infinito

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (ν<sub>eff</sub>) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de k e ν<sub>eff</sub> são apresentados na tabela de resultados.

  
Gabriel Niques

Signatário Autorizado

  
Gabriel Niques

Responsável pela Calibração

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo Cgiprimento, que avalia a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. O Cgiprimento é signatário do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido a calibração, não sendo extensivos a qualquer lote. Este certificado não isenta o instrumento da controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

RBC 01

Campus da Universidade Federal de  
Santa Catarina - UFSC

Sector C  
CEP: 88040-970  
Florianópolis - SC  
Caixa Postal 5053

Tel.: +48 3239 2121  
Fax: +48 3239 2119  
metrologia@certi.org.br  
www.certi.org.br

Fundação CERTI  
CNPJ 78.626.363/0001-24  
Insc. Est. 251.378.241  
Insc. Mun. 50.111-5

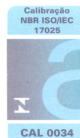


**ANEXO B – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA ESCALA  
GRADUADA**



Laboratório de  
METROLOGIA DIMENSIONAL  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

## Certificado de Calibração



Data da Calibração: 17/02/10

Data da Emissão: 17/02/10

n. 0555/10

Página: 1 de 3

1. CONTRATANTE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
Conjunto Universitário, s/n - Florianópolis - SC

2. SOLICITANTE: O mesmo

3. TRENA CALIBRADA (SMC):

Material: Aço

N° Série (fabricante): Não consta

N° Identificação (solicitante): TRE01

Faixa de Medição: (0 a 10000) mm

Valor de uma Divisão de Escala: 1 mm

4. SÍNTESE DESTA CALIBRAÇÃO:

Conforme procedimentos internos, a maior incerteza de medição encontrada, considerando que seja efetuada a respectiva correção, é de 0,13 mm.

5. PADRÃO UTILIZADO: Laser Interferométrico

N° Registro (CERTI): RC 1903

U: 0,0003 mm

Rastreabilidade: Certificado de Calibração INMETRO DIMCI 0317/2009, de 17/02/09, válido até 02/14.

6. PROCEDIMENTO INTERNO DE CALIBRAÇÃO: PC 220

A trena foi apoiada sobre o barramento de 3 metros de uma máquina de medir longitudinal, traconada por uma massa de 2 kg presa em sua extremidade e ajustada até que ficasse alinhada à trajetória do carro móvel da máquina.

Foi montado o laser interferométrico, também alinhado à trajetória do carro móvel. Os pontos de medição, pré-determinados, foram referenciados na trena utilizando-se uma lente com ampliação. A largura média do traço foi determinada medindo-se 10 traços, aleatoriamente distribuídos ao longo de toda a faixa de medição.

A trena foi calibrada por método de concatenação, simulando-se assim a calibração da trena em uma única etapa (0 a 10000 mm).

Determinou-se como ponto zero da trena a parte interna do encosto de referência (quando possui este encosto).

**Observações:**

A incerteza expandida (U) de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos ( $\nu_{\text{eff}}$ ) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de k e  $\nu_{\text{eff}}$  são apresentados na tabela de resultados.

Condições Ambientais Durante a Calibração:

- Temperatura:  $(20,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

- Umidade Relativa do Ar:  $(50 \pm 10) \%$

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgnet/Inmetro, que avalia a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgnet/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não serve o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O quito de instrumento, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

Campus da Universidade Federal de  
Santa Catarina - UFSC

Setor C  
CEP: 88040-970  
Florianópolis - SC  
Caixa Postal 5053

Tel.: +48 3239 2121  
Fax: +48 3239 2119  
metrologia@certi.org.br  
www.certi.org.br

Fundação CERTI  
CNPJ 78.626.365/0001-24  
Insc. Est. 251.378.241  
Insc. Mun. 50.111-5





Laboratório de  
**METROLOGIA DIMENSIONAL**  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

## Certificado de Calibração



Data de Calibração: 17/02/10

Data da Emissão: 17/02/10

n. 0555/10

Página: 2 de 3

### 7. RESULTADOS:

#### 7.1. Largura do Traço da Escala:

LARGURA DO TRAÇO
MI +/- (U +)Vmáx)
0,33 +/- 0,07 mm

Onde: MI = Média das Indicações dos 10 traços Medidos  
Vmáx = Maior diferença entre a MI e uma indicação qualquer, em módulo

#### 7.2. Calibração da Trena:

TABELA DE RESULTADOS						
INDIC. NO SMC	MÉDIA DAS INDIC. NO SMC	CORREÇÃO	U	k	V <sub>eff</sub>	
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]			
0,00	0,00	0,00	0,03	2,01		476
100,00	99,58	-0,42	0,03	2,01		476
200,00	199,87	-0,13	0,03	2,01		478
300,00	299,75	-0,25	0,03	2,01		481
400,00	399,81	-0,19	0,03	2,01		486
500,00	499,96	-0,04	0,03	2,01		491
600,00	599,92	-0,08	0,03	2,01		498
700,00	700,00	0,00	0,03	2,00		506
800,00	800,03	0,03	0,03	2,00		515
900,00	900,02	0,02	0,03	2,00		526
1000,00	999,91	-0,09	0,03	2,00		538
2000,00	1999,88	-0,12	0,03	2,00		749
3000,00	2999,69	-0,31	0,04	2,00		Infinito
4000,00	3999,33	-0,67	0,06	2,00		Infinito
5000,00	4999,17	-0,83	0,06	2,00		Infinito
6000,00	5999,16	-0,84	0,06	2,00		Infinito
7000,00	6999,02	-0,98	0,09	2,00		Infinito
8000,00	7998,62	-1,38	0,10	2,00		Infinito

Obs.: O valor da correção sempre deverá ser somado algebricamente à indicação.

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Coprel/Inmetro, que avalia a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Coprel/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo estendidos a quaisquer itens. Esta calibração não interfere a instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

#### Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

Campus da Universidade Federal de  
Santa Catarina - UFSC

Setor C  
CEP: 88040-970  
Florianópolis - SC  
Caixa Postal 5053

Tel.: +48 3239 2121  
Fax: +48 3239 2119  
metrologia@certi.org.br  
www.certi.org.br

Fundação CERTI  
CNPJ 78.626.363/0001-24  
Insc. Est. 251.378.241  
Insc. Mun. 50.111-5



Laboratório de  
**METROLOGIA DIMENSIONAL**  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



## Certificado de Calibração

Data da Calibração: 17/02/10

Data da Emissão: 17/02/10

n. 0555/10

Página: 3 de 3

TABELA DE RESULTADOS						
INDIC. NO SMC [mm]	MÉDIA DAS INDIC. NO SMP [mm]	CORREÇÃO [mm]	U [mm]	k	V <sub>eff</sub>	
9000,00	8998,51	-1,49	0,10	2,00	Infinito	
10000,00	9998,34	-1,66	0,13	2,00	Infinito	

Obs: O valor da correção sempre deverá ser somado algebricamente à indicação.

  
Talles José de Oliveira  
Gerente Técnico Substituto

  
Sandro Marçílio Seugling  
Técnico Metrologista

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo Cgmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições especificadas, não sendo estendidos a quaisquer outros. Esta calibração não trata o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

### Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

Campus da Universidade Federal de  
Santa Catarina - UFSC

Setor C  
CEP: 88040-970  
Florianópolis - SC  
Caixa Postal 5953

Tel.: +48 3239 2121  
Fax: +48 3239 2119  
metrologia@certi.org.br  
www.certi.org.br

Fundação CERTI  
CNPJ 78.626.363/0001-24  
Insc. Est. 251.378.241  
Insc. Mun. 50.111-5

## REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR 5680: Dimensões de tubos de PVC rígidos - Especificação*. Rio de Janeiro, 1977.
- ALBERTAZZI Jr., A. G.; SOUZA, A. R. de. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. Barueri-SP: Manole, 2008.
- BIPM; IEC; IFCC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML. *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*. 3. ed. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, INMETRO, 2003. 120 p. Terceira edição brasileira em língua portuguesa.
- BOULANGER, R. J. et al. Radio-frequency techniques for measuring water levels in narrow-diameter piezometers. *Journal of Microwave Power*, v. 5 (2), p. 69–71, 1970.
- BRAGA, R. M. de et al. Procedimento de ultra-som para inspeção de weldolets. In: *6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos - 6ª COTEC*. Salvador/BA: [s.n.], 2002.
- CBGB. *Auscultação e instrumentação de Barragens no Brasil*. Belo Horizonte - MG, 1996.
- CEASB, C. Segurança de barragens na itaipu binacional. In: *Workshop: Segurança de Barragens - Formação de Especialistas*. Foz do Iguaçu - PR: [s.n.], 2008.
- CHANG, H. S. *Level Measurement Method Using Measurements of Water Column Pressure Therefor*. 1998. 5791187.
- CHEEKE, J. D. N. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. [S.l.]: CRC Press LLC, 2002.
- DEVINE, P. *Radar Level Measurement: The user's guide*. [S.l.]: VEGA Controls, 2000.
- DOEBELIN, E. O. *Measurement Systems - Application and Design*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983.
- DUNNICLIFF, J. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. New York, NY: Wiley-Interscience, 1993.
- FESTO. *Válvulas reguladoras de caudal, estranguladoras y combinación de funciones*. [S.l.], 2009. Disponível em: <[www.festo.com/catalogue](http://www.festo.com/catalogue)>.

- FOLHA ONLINE. *Bombeiros localizam corpo de menina desaparecida após queda de barragem em Cocal (PI)*. junho 2009. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u581237.shtml>>.
- FONSECA, E. *Determinação Indireta das Propriedades Mecânicas de Aço ASTM A36 Laminado com uso de Ultra-som*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- INMETRO. *Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia*. 5. ed. Rio de Janeiro - RJ: Ed. SENAI, 2007.
- INMETRO. *Orientações para a Realização de Calibração de Medidores Digitais de Pressão. DOQ-CGCRE-014*. Revisão 00. [S.l.], Fevereiro 2008.
- ITAIPU. *Descripción de Funcionamiento - Piezómetro tipo stand pipe*. [S.l.], 2004.
- ITAIPU BINACIONAL. *Fichas de Campo para Monitoramento de Reservatórios*. Foz do Iguaçu-PR, 2000–2002.
- KTEKCOPORATION. *MT5000 Guided Wave Radar Liquid Level Transmitter*. [S.l.], 2008.
- KULKARNI, A. A.; JOSHI, J. B. Bubble formation and bubble rise velocity in gas-liquid systems: A review. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 44, p. 5873–5931, 2005.
- LABORATORY, W. R. R. Water measurement manual. In: \_\_\_\_\_. Washington DC: [s.n.], 2001. cap. Measuring and Recording Water Stage or Head.
- LIGOCKI, L. P. *Comportamento geotécnico da barragem de Curuá-Una, Pará*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2003.
- MEDEIROS, C. H. Segurança e auscultação de barragens. In: *XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 13–50.
- NIT-DICLA-021. 2010. Expressão da Incerteza de Medição na Calibração.
- PIASSI, V. da S. M. *Comportamento Complexo na formação de bolhas de ar em líquidos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

- SIGHIERI, L.; NISHINARI, A. *Controle Automático de Processos Industriais - Instrumentação*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1980.
- SILVEIRA, J. F. A. *Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto*. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.
- SILVEIRA, J. F. A. *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento*. [S.l.]: Oficina de Textos, 2006.
- SKOLNIK, M. *Radar Handbook*. New York: Mc Graw Hill, 2008.
- TANDESKE, D. *Pressure Sensors: Selection and Application Mechanical Engineering*. New York: CRC Press, 1991.
- TAVEIROS, A. W. et al. Utilização do ultrassom para sexar fetos equinos da raça mangalarga marchador pela visualização do tubérculo genital e da genitália. *Medicina Veterinária*, v. 2, n. 4, p. 35–40, 2008.
- VALENTE, L. C. G. et al. Técnicas de leitura para sensores a fibra óptica baseados em redes de bragg. In: *6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*. Salvador - BA: [s.n.], 2002.
- WEBSTER, J. G. Measurement, instrumentation, and sensors handbook crc-netbase. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: CRC Press LLC, 1999. cap. Displacement Measurement, Linear and Angular, p. 91–257.
- WILSON, J. S. (Ed.). *Sensor Technology Handbook*. 1st. ed. [S.l.]: Elsevier Inc., 2005.
- WYLEN, G. V.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. *Fundamentos da Termodinâmica - Tradução da 6ª edição americana*. 6. ed. [S.l.]: Edgard Blucher, 2003.
- ZUCCHINI, R. R.; THEMUDO, J. de S. Desenvolvimento de método de medição de massa específica pelo princípio de arquimedes. *Projeções*, v. 23, p. 7–12, jan/dez 2005.