

4 Instrumentação

A função da instrumentação é fornecer aos responsáveis pela auscultação da barragem parâmetros de comparação com as hipóteses consideradas no projeto. Ou seja, é fornecer mecanismos para avaliar o desempenho da estrutura.

Define-se como auscultação o conjunto de métodos de observação do comportamento de uma determinada obra de engenharia, com o objetivo de controlar as suas condições de segurança, comprovar a validade das hipóteses e dos métodos de cálculo utilizados no projeto, verificar a necessidade da utilização de medidas corretivas, fornecer subsídios para a elaboração de novos critérios de projeto, etc.

A barragem de terra da margem esquerda de Itaipu foi instrumentada com nove piezômetros elétricos, vinte e seis piezômetros standpipe, doze medidores de nível de água e quatro medidores de vazão de placa triangular. Há também alguns drenos que são utilizados como medidores de vazão.

4.1. Piezômetros

A função dos piezômetros é fornecer a carga de pressão no ponto em que foi instalado. Conhecida a carga de pressão, calcula-se a carga total naquele ponto, que é a cota de instalação mais a coluna de água sobre o mesmo. Na BTME há dois tipos de piezômetros: standpipe (ou Casagrande) e elétrico de corda vibrante. Em ambos os casos, o valor de leitura fornecido é a cota piezométrica, que é a soma da carga de elevação mais a carga de pressão no ponto de instalação. Ou seja, é fornecida a carga total no ponto de instalação, em relação ao nível do mar.

4.1.1. Piezômetro Standpipe

O piezômetro standpipe é um piezômetro de “tubo aberto”. Ele é constituído de um bulbo, instalado no local onde se pretende medir a carga de pressão, e um tubo que liga o bulbo até o local onde será feita a leitura. O bulbo

é instalado em um furo de sondagem previamente limpo. Ao redor do bulbo normalmente é colocada uma camada de areia. Sobre a camada de areia, há um selo de bentonita ou solo-cimento, para isolar o bulbo. O resto do furo de sondagem é preenchido com o solo natural. Os piezômetros standpipe são instrumentos de fácil confecção e instalação, alta durabilidade e confiabilidade. A leitura do instrumento normalmente é feita com um pio elétrico, que é uma trena com uma ponteira elétrica que emite som assim que entrar em contato com a água. Dessa forma, mede-se a distância entre a boca do tubo e o nível de água. Como a distância entre o bulbo e a boca do tubo é conhecida, por subtração encontra-se a altura de coluna de água sobre o bulbo. De posse da altura de coluna de água sobre o ponto de instalação, soma-se a mesma à cota de instalação, obtendo-se a cota piezométrica, em metros sobre o nível do mar (msnm). A cota piezométrica é a carga hidráulica total no ponto, em relação ao nível do mar. A Figura 6 ilustra um piezômetro Standpipe.

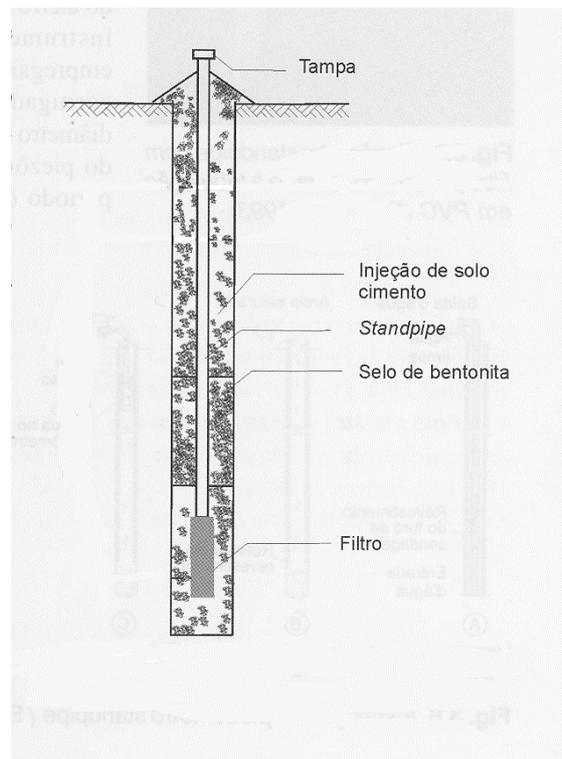


Figura 6 – Piezômetro Standpipe

Como já mencionado, há 26 piezômetros standpipe instalados na BTME. Estão instalados nas feições instrumentadas conforme indicado na Tabela 4.

Argila Vermelha de Fundação (9)	Solo Saprolítico (16)	Tapete drenante (1)
PSL3, PSL4, PSL6, PSL10, PSL11, PSL13, PSL16, PSL25 e PSL26	PSL1, PSL2, PSL5, PSL7, PSL8, PSL9, PSL12, PSL14, PSL15, PSL17, PSL18, PSL20, PSL21, PSL22, PSL23, PSL24	PSL19

Tabela 4 – Piezômetros Standpipe por feição

Os valores de cotas piezométricas fornecidos pelos piezômetros standpipe variam em função do nível do reservatório. Como o nível do reservatório varia em condições normais entre as cotas 220,20 e 219,00 m, as variações de cotas piezométricas ao longo do tempo são pequenas, tanto para os piezômetros instalados na argila quanto para os instalados no solo saprolítico. Abaixo são mostrados os gráficos do PSL 10 (Figura 7), instalado na argila, e PSL21 (Figura 8), instalado no solo saprolítico.

PSL10

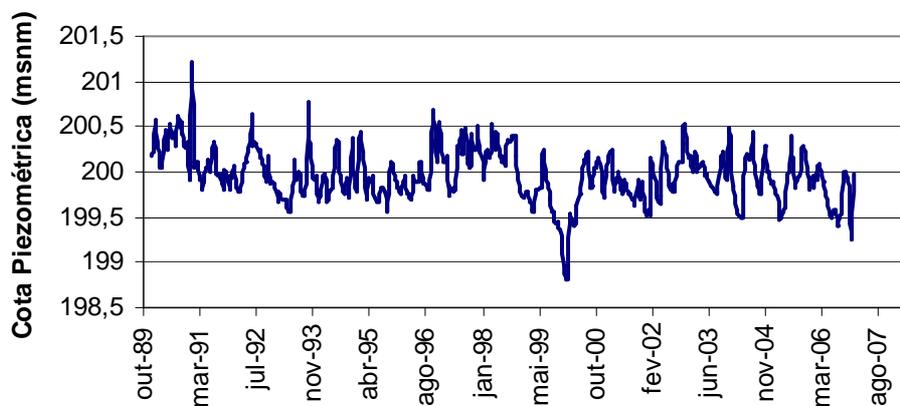


Figura 7– PSL10

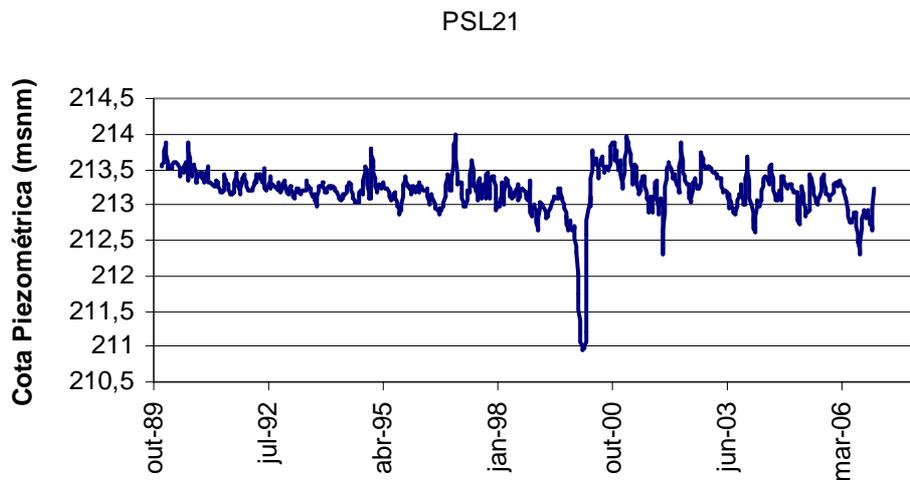


Figura 8– PSL21

Em ambos os gráficos, os menores valores de cota piezométrica foram os registrados em janeiro de 2000, quando devido à grande seca, o reservatório chegou ao nível mínimo histórico, na cota 215,48 m.

4.1.2. Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante

Os piezômetros elétricos de corda vibrante medem a pressão de água através da deformação de um diafragma interno, cuja deflexão é medida por um sensor de corda vibrante instalado perpendicularmente ao plano do diafragma, Silveira (2006). A Figura 9 mostra uma célula de piezômetro de corda vibrante. Na barragem de Itaipu, o valor de pressão lido é transformado de kilograma-força por centímetro quadrado (kgf/cm^2) para metros de coluna de água (m.c.a.). A altura de coluna de água é somada à cota de instalação, fornecendo a cota piezométrica no ponto, em metros sobre o nível do mar (msnm).

Atualmente os piezômetros de corda vibrante vêm sendo largamente empregados na auscultação de barragens, por serem precisos, sensíveis, poderem ser lidos à distância e integrados a sistemas automáticos de aquisição de dados. Contudo, tem a desvantagem de vida útil limitada e de alteração dos parâmetros de calibração que ocorre ao longo do tempo. E como o instrumento está instalado no maciço, não é possível recalibrá-lo periodicamente, o que pode ocasionar perda de precisão nas leituras.

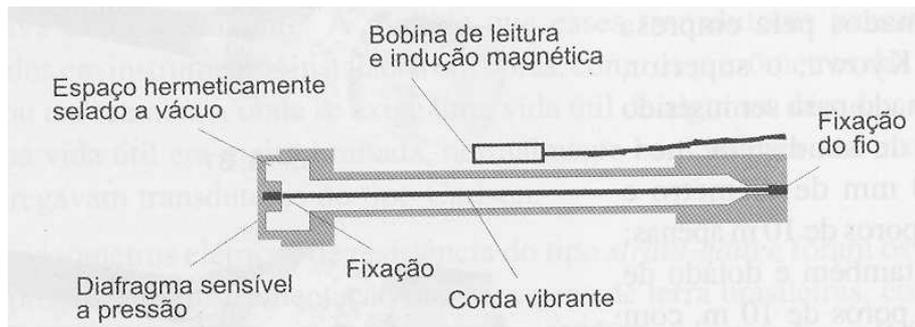


Figura 9 – Piezômetro de Corda Vibrante

Dos nove piezômetros elétricos, oito (PGL1, PGL3, PGL4, PGL5, PGL6, PGL7, PGL8 e PGL9) estão instalados na argila vermelha de fundação. Apenas o PGL2 está instalado no solo saprolítico. Da mesma maneira que os piezômetros standpipe, os piezômetros elétricos também possuem uma amplitude pequena de variação, que ocorre em função dos níveis do reservatório. A Figura 10 mostra os valores de cota piezométrica medidos entre janeiro de 1990 e janeiro de 2007 pelo PGL01.

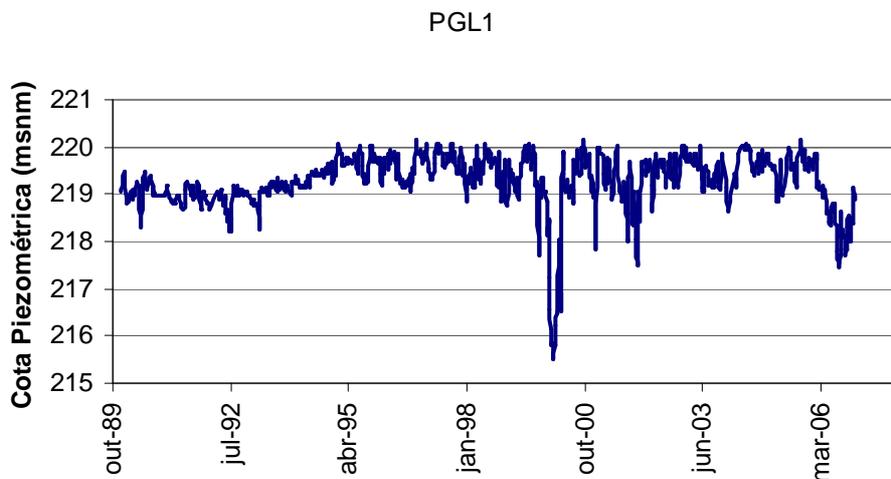


Figura 10– PGL01

O PGL3 e PGL4 estão danificados e não apresentam mais leituras desde julho de 2000.

4.1.3. Cotas Piezométricas

Com o objetivo de visualizar melhor como as cotas piezométricas variam ao longo da barragem, traçou-se curvas de mesma cota piezométrica para os piezômetros da argila vermelha e do solo saprolítico utilizando-se o programa

Surfer versão 6.02. Para cada piezômetro foi considerado como cota piezométrica a média de todas as leituras no período entre janeiro de 1986 e janeiro de 2007.

Nas figuras abaixo são mostradas as curvas de mesma cota piezométrica para os instrumentos da argila e solo saprolítico. Os pontos em vermelho são os instrumentos. Os valores no eixo horizontal são as coordenadas norte e os valores do eixo vertical, as coordenadas leste. As figuras são uma vista em planta das regiões de mesma cota piezométrica. O eixo da barragem é aproximadamente perpendicular às linhas de piezômetros.

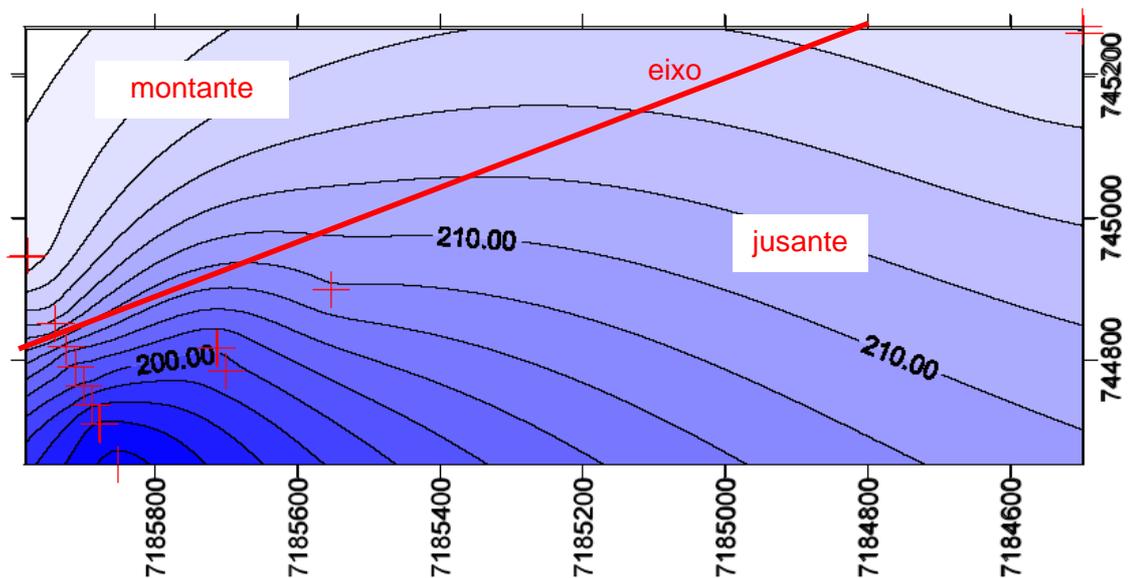


Figura 11 – Curvas de mesma Cota Piezométrica para os piezômetros instalados na argila

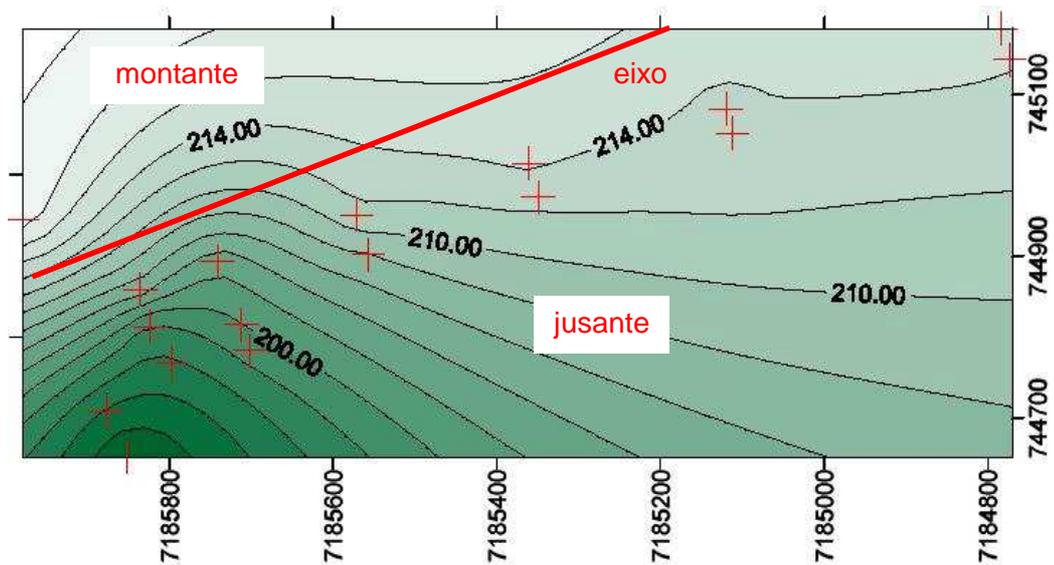


Figura 12 – Curvas de mesma Cota Piezométrica para os piezômetros instalados no solo saprolítico

4.2. Medidor de Nível de Água

A função do medidor de nível de água é indicar a cota da superfície freática no ponto onde o medidor está instalado. Basicamente ele é um piezômetro standpipe sem o selo de bentonita sobre o bulbo. Todo o furo de instalação do instrumento é preenchido com areia até a superfície do terreno. Só próximo à superfície que o selo é aplicado. A leitura é feita da mesma maneira que no piezômetro standpipe, com um pio elétrico. Mede-se a distância entre a boca do tubo e o nível de água. Calcula-se, por subtração, a altura de coluna de água dentro do tubo. Como a cota de instalação do bulbo é conhecida, somando-se a altura de coluna de água à cota do bulbo obtém-se a cota da superfície freática naquele ponto.

A figura a seguir mostra o PZL8.

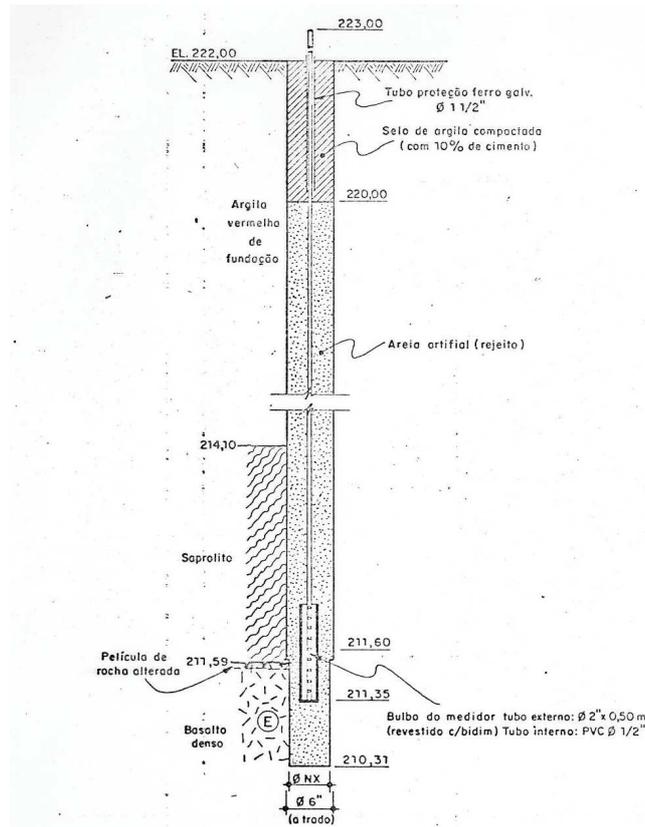


Figura 13 – Medidor de Nível de Água (PZL8)

Há 12 medidores de nível de água instalados na barragem de terra da margem esquerda (PZL1, PZL2, PZL3, PZL4, PZL5, PZL6, PZL7, PZL8, PZL9, PZL10, PZL11 e PZL12). As leituras dos medidores de nível de água também variam pouco e de acordo com o nível do reservatório, como pode ser observado na Figura 14, do PZL07.

PZL07

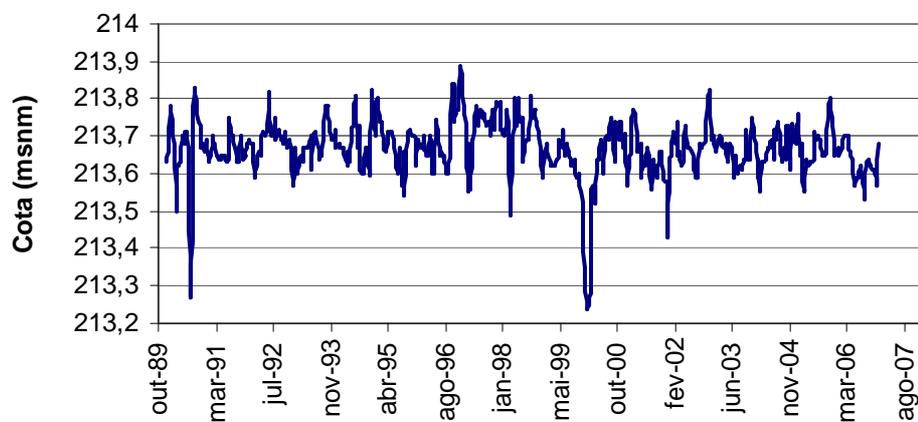


Figura 14– Nível do PZL07

O nível de água ao longo da barragem reflete a declividade do terreno de fundação, cujas cotas crescem em direção à ombreira esquerda. A Figura 15 mostra o nível freático obtido a partir dos medidores de nível de água ao longo do estaqueamento. É importante lembrar que os medidores de nível de água são os instrumentos mais afastados do eixo da barragem. Quanto menor o estaqueamento, maior a seção da barragem e mais afastado do eixo está o medidor. O PZL2 por exemplo, na estaca 123 + 50, está a 270 m a jusante do eixo da barragem. Já o PZL9, na estaca 140 + 00, já bem próximo ao fim da barragem, está a 29,30 m do eixo.

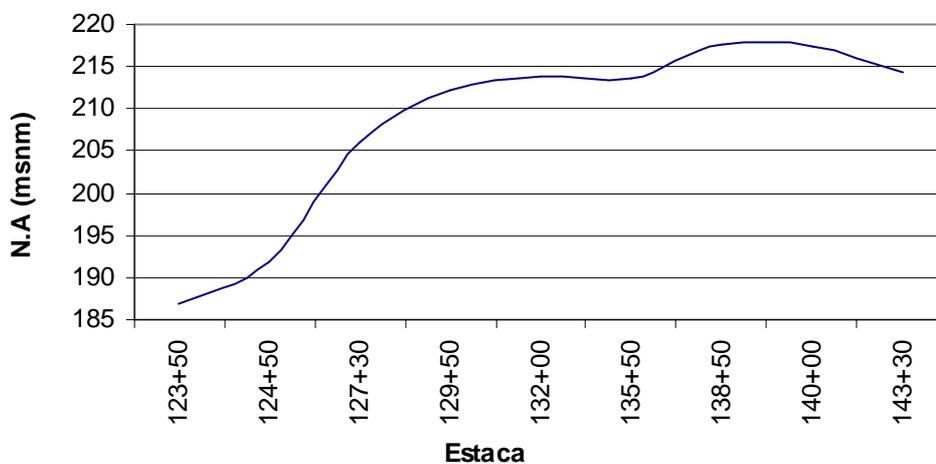


Figura 15– Superfície Freática a jusante

4.3. Medidor de Vazão

Um das grandezas mais importantes de serem monitoradas em uma barragem são as vazões de infiltração, uma vez que sua função primordial é impedir o fluxo para criar o reservatório. Para medir essas vazões, as barragens são dotadas de sistemas de canaletas que conduzem a água infiltrada (ou pelo menos parte dela) a determinados dispositivos que permitem a medida da vazão. No caso de Itaipu, existem dois dispositivos para determinar a vazão, medidores de placa triangular e tubos onde a medida é feita com proveta e cronômetro.

4.3.1. Medidor de Vazão de Placa Triangular

O medidor de vazão de placa triangular é um dispositivo que permite determinar a vazão em um canal com base na altura de coluna de água que fica

acima do vértice do triângulo que serve como vertedor. Segundo Silveira (2006) ele é preciso para vazões inferiores a 30l/s. Contudo, pode ser utilizado para vazões de até 300 l/s. A foto a seguir mostra um medidor do tipo triangular.



Foto 7– Medidor de Vazão de Placa Triangular

As fórmulas mais utilizadas para o cálculo da vazão (m^3/s) para medidor com vértice de 90° são as seguintes, Silveira (2006):

- Thompson – $Q = 1,40.h^{5/2}$, h em metros;
- Gouley e Crimp - $Q = 1,32.h^{2,48}$, h em metros.

Nas formulações acima, h é altura de coluna de água acima do vértice da placa.

Em ambas as fórmulas, as seguintes condições devem ser atendidas:

- $0,05 < h < 0,38$ m;
- $P > 3h$;
- $B > 6h$;
- O medidor de nível deve estar a uma distância da placa superior a 4h.

Os valores P, B e h são os mostrados na Figura 16.

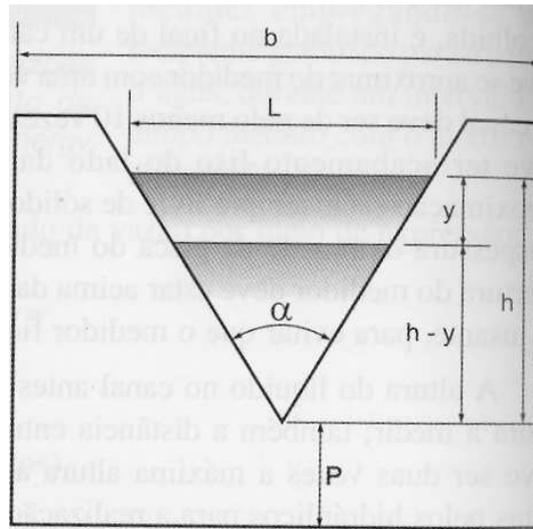


Figura 16 – Geometria de Medidor de Placa Triangular

Nos medidores da Itapu, é utilizada uma variação da fórmula de Thompson: $Q = 1,46.h^{5/2}$.

Na Figura 17 é mostrada a vazão calculada pelas três formulações apresentadas, para a mesma altura h .

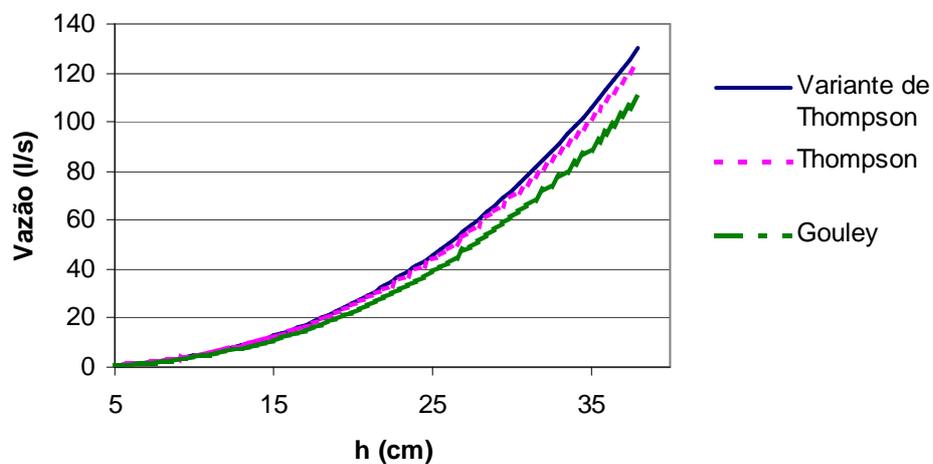


Figura 17 – Vazões no Medidor de Vazão de placa Triangular com vértice de 90° para as formulações de Thompson e Gouley e Crimp.

A diferença entre os valores fornecidos pelas duas fórmulas de Thompson é de 4,1%.

Na BTME há quatro medidores de vazão de placa triangular, MVL1, MVL2, MVL3 e MVL4. As leituras manuais são realizadas semanalmente. Após 2005

esses instrumentos foram automatizados e as leituras automáticas são realizadas a cada 30 min. Contudo as leituras manuais semanais continuam sendo realizadas. As figuras a seguir mostram as vazões lidas manualmente de janeiro de 1990 a abril de 2007.

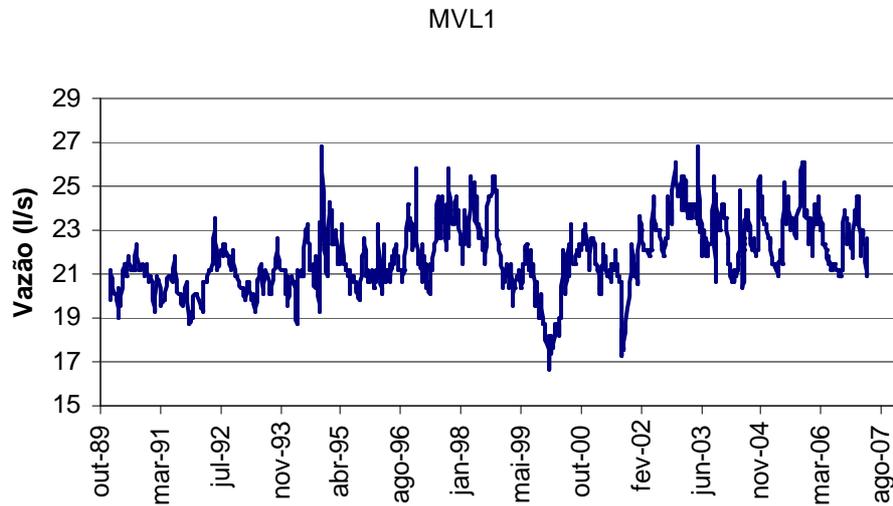


Figura 18 – Vazões medidas manualmente no MVL1

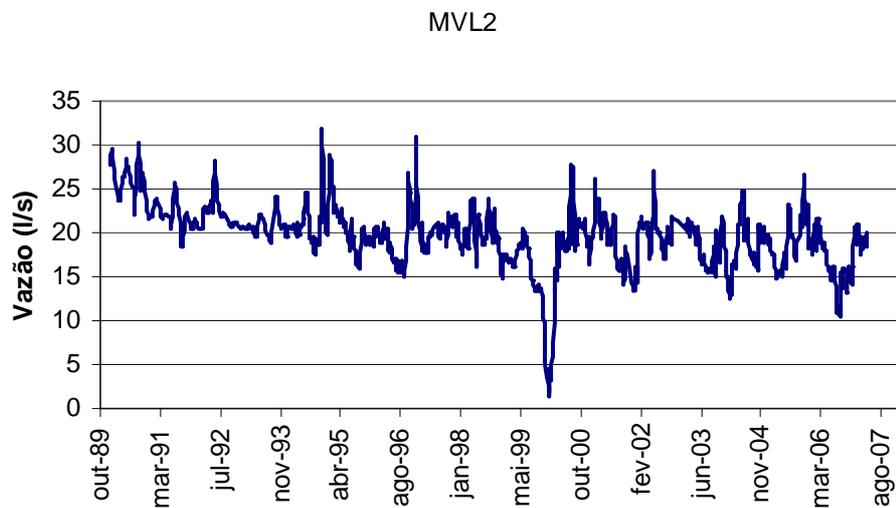


Figura 19 – Vazões medidas manualmente no MVL2

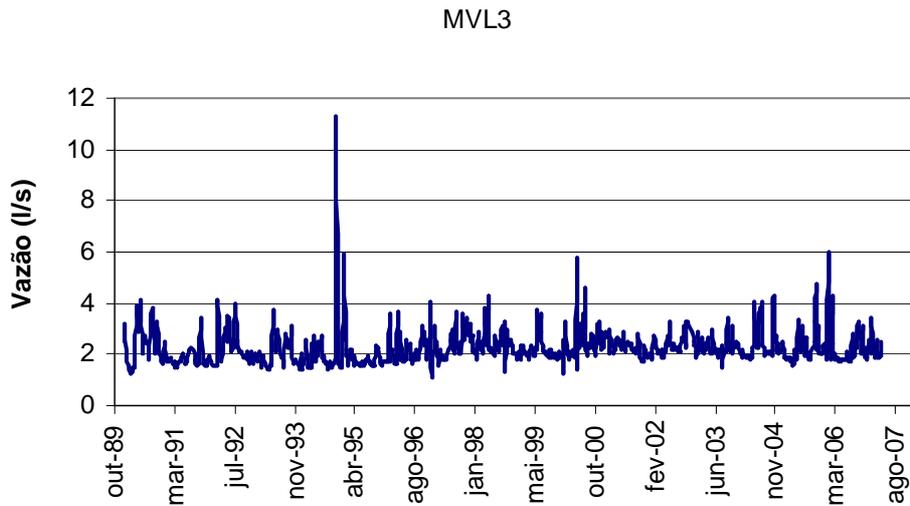


Figura 20 – Vazões medidas manualmente no MVL3

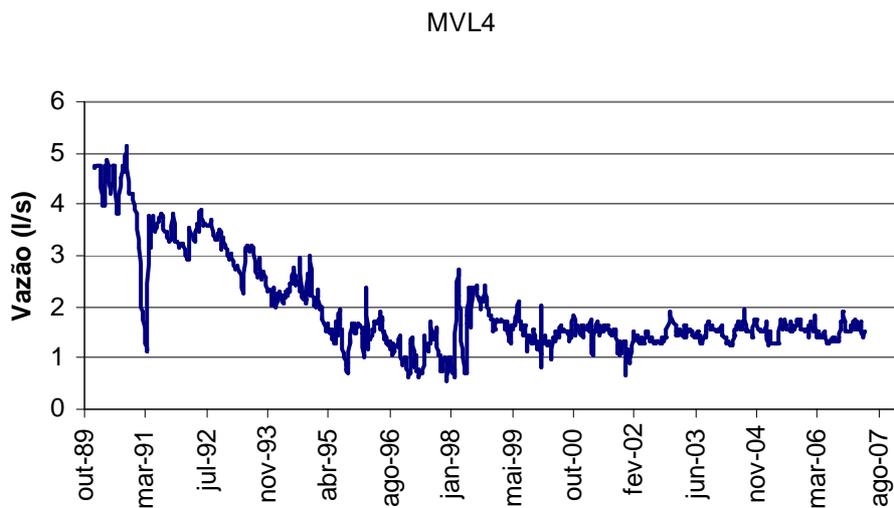


Figura 21 – Vazões medidas manualmente no MVL4

4.3.2. Tubos de Drenagem

Há dois tubos de drenagem que são considerados medidores de vazão por terem a vazão monitorada. São designados de MVL5 e MVL6. A medida da vazão, por ser pequena, é feita com proveta e cronômetro. Os gráficos das vazões desses instrumentos, de janeiro de 1990 a abril de 2007 são mostrados a seguir.

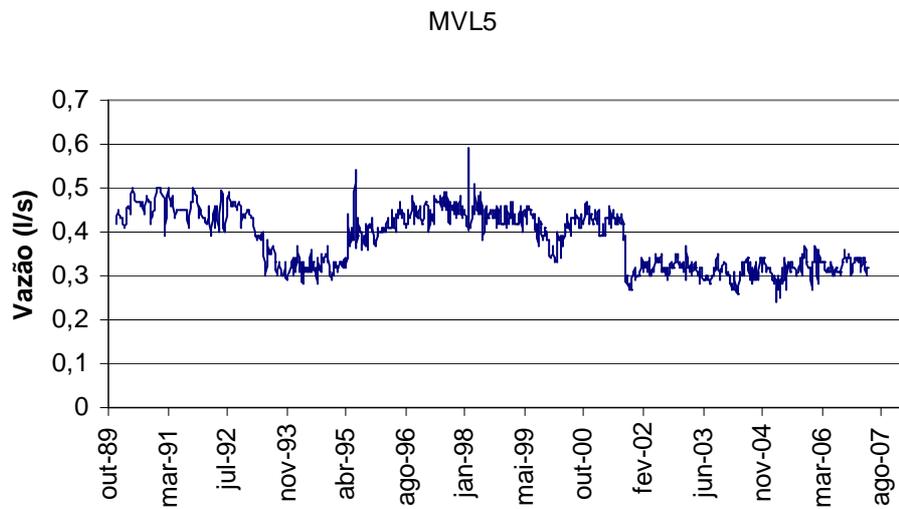


Figura 22 – Vazões do MVL5

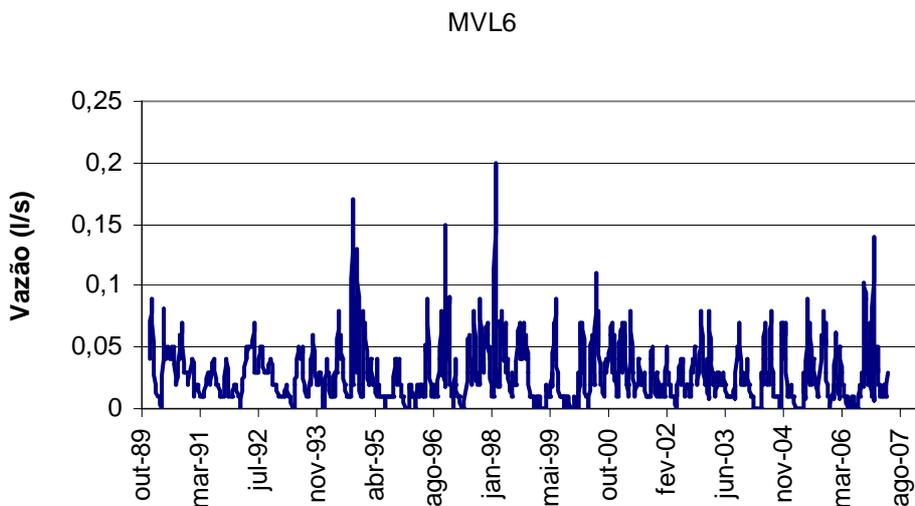


Figura 23 – Vazões do MVL6

4.4. Localização dos Instrumentos

Os instrumentos da BTME estão localizados ao longo de 12 seções instrumentadas. As seções e respectivos instrumentos estão listados a seguir:

- Estaca 123 + 50 – 9 piezômetros elétricos (PGL1, PGL2, PGL3, PGL4, PGL5, PGL6, PGL7, PGL8, PGL9), 5 piezômetros standpipe (PSL3, PSL4, PSL5, PSL6 e PSL7) e um medidor de nível de água (PZL2);
- Estaca 124 + 00 – 1 medidor de nível de água (PZL1);
- Estaca 124 + 50 – 3 piezômetros standpipe (PSL1, PSL8 e PSL9) e 1 medidor de nível de água (PZL3);
- Estaca 125 + 50 – 6 piezômetros standpipe (PSL2, PSL10, PSL11, PSL12, PSL13 e PSL14);
- Estaca 127 + 30 – 3 piezômetros standpipe (PSL15, PSL16 e PSL17) e 1 medidor de nível de água (PZL4);
- Estaca 129 + 10 – 1 medidor de nível de água (PZL12);
- Estaca 129 + 50 – 3 piezômetros standpipe (PSL18, PSL19 e PSL20) e 1 medidor de nível de água (PZL5);
- Estaca 132 + 00 – 2 piezômetros standpipe (PSL21 e PSL22) e 1 medidor de nível de água (PZL6);
- Estaca 135 + 50 – 2 piezômetros standpipe (PSL23 e PSL24) e 1 medidor de nível de água;
- Estaca 138 + 50 – 2 piezômetros standpipe (PSL25 e PSL26) e 1 medidor de nível de água (PZL8);
- Estaca 140 + 00 – 1 medidor de nível de água (PZL9);
- Estaca 142 + 00 – 1 medidor de nível de água (PZL10);
- Estaca 143 + 30 – 1 medidor de nível de água (PZL11).

O anexo 6 mostra a localização em planta dos instrumentos na barragem e os anexos 7, 8, 9 e 10 mostram as seções transversais instrumentadas.

Cinco desses instrumentos não estão em operação. O PGL3 e o PGL4, que são piezômetros elétricos, não estão mais funcionando. O PSL19 está instalado no tapete drenante da estaca 129 + 50. Como não há fluxo pelo tapete, ele não indica carga. O PZL 10 não foi perfurado suficientemente e não intercepta o lençol freático. O PZL12 foi instalado a jusante da cortina de drenagem na seção da estaca 129 + 10. Como seria de se esperar em condições normais, não indica nada. Há um piezômetro com valores de leitura aparentemente inconsistentes, o PSL21. Este instrumento, instalado na seção da estaca 132 + 00, indica carga cerca de 0,80 m inferior à do piezômetro instalado a jusante na mesma seção, o PSL22. Esse fato provavelmente é explicado pelo fato de o bulbo do PSL21 estar todo em rocha sã e rocha alterada. Já o bulbo do

PSL22 está praticamente todo no solo saprolítico, atravessa apenas 30 cm de rocha alterada, sendo seu comprimento total de 2,3 m. É de se esperar que a rocha alterada, por ser muito fraturada, tenha permeabilidade maior que o solo saprolítico. Os demais instrumentos apresentam comportamento considerado adequado.

Há um sistema de canaletas para coletar a água que percola pelo sistema de filtros da barragem e a água de chuva que escoar pelos taludes de jusante. A água desse sistema de canaletas é conduzida a dois medidores de vazão, o MVL2 e o MVL3.. Os anexos 11 e 12 mostram o sistema de canaletas. Há ainda um sistema de poços de alívio no pé da barragem para controle das subpressões. Esse sistema é composto por 25 furos de 20 cm de diâmetro que vão até o solo saprolítico, da estaca 121 + 50 até a 128 + 80. O anexo 13 mostra o sistema de poços de alívio. Apenas os poços DRL 4 a 8 apresentam vazão.

O MVL2 está localizado na estaca 133 + 16 e mede a vazão da água coletada no sistema de canaletas que vai da estaca 142 + 36,50, na ombreira esquerda, à estaca 130 + 50, o que perfaz quase 1200 m. Contudo, quase não há percolação pelo sistema de filtros interno da barragem. O volume de água que sai do filtro é suficiente apenas para criar uma pequena lâmina de água no fundo da canaleta. A vazão do MVL2 é quase que totalmente proveniente do bueiro que deságua na canaleta na altura da estaca 133 + 50.

O MVL3 mede a água de todo o restante do sistema de canaletas. A contribuição de águas provenientes dos filtros da barragem é desprezível, muitas vezes menor que a parcela do MVL2, não chegando nem a provocar fluxo pelas canaletas. A vazão do MVL3 é constituída essencialmente pelos drenos que existem na parede da canaleta de pé da barragem, poços de alívio (DRL4, DRL5, DRL6, DRL7 e DRL8) e pelo MVL5 e MVL6. O MVL5, na estaca 124 + 11, é um dreno no fundo da canaleta de pé da barragem que tem a vazão medida devido à mesma ser considerável frente aos demais drenos, por isso passando a constituir um medidor. O MVL6, na estaca 124 + 15, drena uma pequena área a montante da saída do filtro no talude de jusante.

O MVL1, na estaca 123 + 90, foi construído para medir a água que é coletada de um sistema de espinhas de peixe construído a jusante da canaleta de drenagem do pé da barragem. O MVL4, estaca 123 + 76, mede a vazão de água a jusante do pé da barragem.