

7

Análise dos Resultados e Conclusões

7.1. Análise dos Resultados

7.1.1. MVL1

O MVL1 mede a vazão coletada por um sistema de drenos tipo espinha de peixe construído logo a jusante da canaleta de drenagem do pé da barragem. O coeficiente de correlação linear entre o MVL1 e o reservatório é de 0,42, o que indica correlação fraca. Analisando-se a Figura 2 e a Figura 18, percebe-se que há relação entre a vazão do MVL1 e o nível do reservatório. Pela Figura 41, Figura 49 e Figura 57, percebe-se que a maior parcela de fluxo medido no MVL1 é proveniente da argila. É interessante notar na Figura 49 que a correlação com os instrumentos da estaca 123 + 50 é negativa, principalmente na região do PGL7, PGL8 e PGL9. Provavelmente isso está associado ao fato de que a água que é coletada pela espinha de peixe do MVL1 escoar até a região dos piezômetros supra citados. Quando a vazão aumenta, diminui a subpressão. Portanto, a vazão medida no MVL1 é preponderantemente proveniente do escoamento que se dá da estaca 129 + 00 para a estaca 122 + 00, em função da topografia da região. O anexo 13, que mostra o nível de água nos poços de alívio em 1990, ilustra bem esse fato. O fato de o nível de água acompanhar a forma do topo da camada de solo saprolítico indica que há um contraste razoável de permeabilidade entre a argila de fundação e o solo saprolítico, sendo o solo saprolítico impermeável frente a argila. Se o solo saprolítico fosse mais permeável que a argila, a superfície freática iria acompanhar a forma da rocha sã e provavelmente iria surgir na área compreendida entre os poços 12 e 15, o que não ocorre.

7.1.2. MVL2

Como já mencionado, o MVL2 mede a vazão do sistema de canaletas entre as estacas 130 + 50 e 142 + 36,50. Sua vazão oscila entre 15 e 25 l/s, conforme pode ser observado na Figura 19. Esses valores são bem superiores ao previsto no modelo numérico. A partir dos valores da Tabela 10, a vazão

esperada no MVL 2 seria $Q = 50 \times 5,3 \cdot 10^{-6} + 6,83 \cdot 10^{-4} + 9,68 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-3} = 3,07 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 3,07 \text{ l/s}$, cerca de 6,5 vezes menor que o medido. Esse valor é obtido somando-se as vazões de cada trecho até o MVL2. Como a fundação da barragem possui uma leve declividade em direção à direita hidráulica nessa região, poder-se-ia pensar em um fluxo na direção do eixo, a partir da esquerda hidráulica. Na Figura 15 pode-se ver que entre as estacas 135 + 50 e 138 + 50 há um gradiente hidráulico de aproximadamente 0,013. Os medidores de nível de água PZL7 e PZL8, que mediram esse gradiente, estão a menos de 10 m da canaleta, que é a área de interesse. Calculando a vazão pela fundação através da fórmula de Darcy, chega-se aos seguintes valores de vazão para a argila e para o solo saprolítico.

- Argila

$$Q = k \cdot i \cdot A = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,013 \cdot 3,5 = 1,56 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$$

- Solo saprolítico

$$Q = k \cdot i \cdot A = 5 \cdot 10^{-8} \cdot 0,013 \cdot 7,5 = 2,28 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s} = 2,28 \cdot 10^{-5} \text{ l/s}$$

A soma das duas vazões seria $1,58 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$, é insignificante frente ao valor lido no MVL2. Em ambos os casos, considerou-se como área a espessura da camada na região multiplicada por 5 m, que é a extensão considerada de influência do bueiro que deságua próximo à estaca 133 + 50.

Portanto, como discutido no item 5.3, a vazão do bueiro deve ser proveniente de uma camada mais permeável muito provavelmente localizada na transição entre a camada de argila e o solo saprolítico.

Analisando a Figura 42, Figura 50 e Figura 58, pode-se concluir que a vazão no MVL2 está relacionada à camada de solo saprolítico, devido à alta correlação com os instrumentos dessa camada. Julga-se que as correlações do MVL2 com os piezômetros da argila não são tão elevadas em função da topografia da região em que a maioria dos piezômetros da argila está instalada. É uma região de fundo de vale onde ocorre acúmulo de água. Da Figura 58, também pode-se concluir que há relação apenas moderada entre as vazões no MVL2 e o nível de água a jusante. Os medidores de nível de água na área de influência do MVL2 são o PZL7, PZL8 e PZL9. Esses instrumentos possuem coeficiente de correlação com o reservatório de 0,67, 0,78 e 0,81, respectivamente. Já o MVL2 possui coeficiente de correlação de 0,70 com o reservatório. Esses fatos levam à conclusão de o bueiro que deságua no MVL2 deve coletar água proveniente do reservatório. Como o solo da região é residual, pode existir uma camada mais permeável originada de fratura reliquiar da rocha

mãe, daí o fato da alta vazão não ser explicada nem pelo modelo numérico (sem considerar camada permeável) e nem pela fórmula de Darcy. Observando-se a Figura 67, é clara a influência do reservatório nas vazões do MVL2.

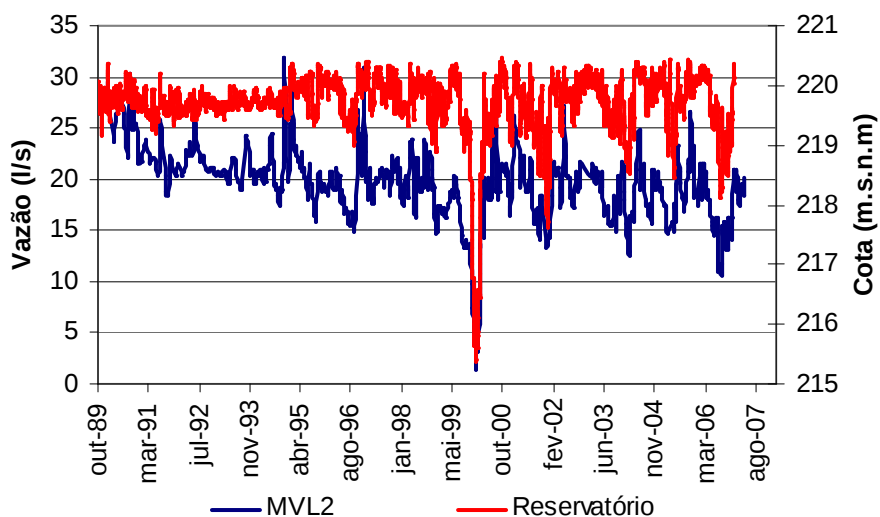


Figura 67 – Vazões no MVL2 e Nível do Reservatório

No período do maior deplecionamento, janeiro de 2000, as vazões foram quase a zero. Fica evidente que o cálculo com a equação de Darcy é muito simplificado. Mas o importante é a ordem de grandeza da vazão fornecida. O pequeno valor obtido é suficiente para indicar que a percolação de ombreira não é significativa na área do MVL2.

Observando a Figura 58 e a Tabela 14, vê-se que o MVL2 apresenta correlação negativa de $-0,61$ com o PZL1. Também na mesma tabela constata-se que o PZL1 não apresenta correlação com o nível do reservatório. Esse fato é inesperado pois o PZL1 está localizado 5 m a montante do eixo da barragem, no aterro compactado. Ao que indica, o PZL1 deve estar colmatado. A Figura 68 mostra os valores lidos pelo PZL1 e PZL8. O período marcado em verde corresponde ao deplecionamento do reservatório em janeiro de 2000, quando atingiu a cota 215,43 m. Todos os piezômetros e medidores de nível de água mostram nitidamente o deplecionamento, com exceção do PZL1.

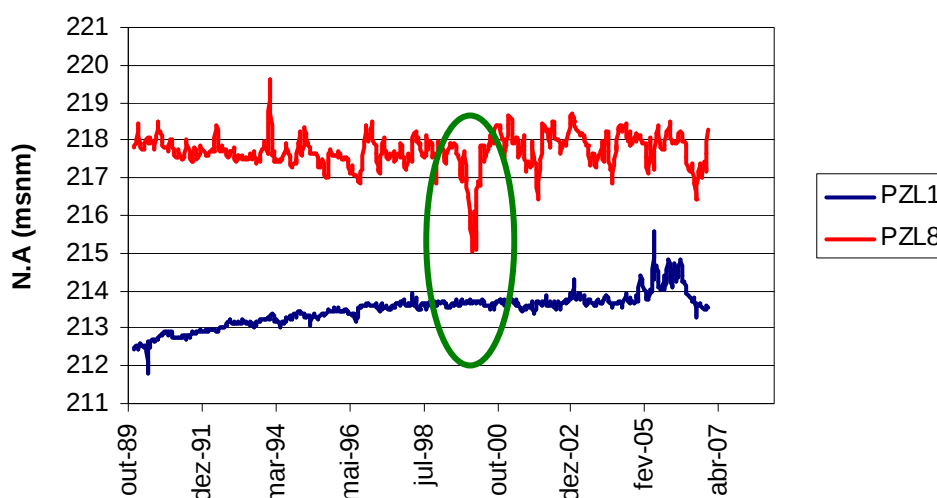


Figura 68 – Medidas do PZL1 e PZL8

7.1.3. MVL3

O MVL3 é o que coleta o restante da água das canaletas. Pelo modelo numérico, a vazão entre as estacas 123 + 00 e 130 + 50, com os valores da Tabela 10, seria:

$Q = 1,53 \cdot 10^{-4} + 2,47 \cdot 10^{-4} + 4,20 \cdot 10^{-4} + 3,81 \cdot 10^{-4} + 250 \times 5,30 \cdot 10^{-6} = 2,53 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$
 $= 2,53 \text{ l/s}$. A vazão média do MVL3, de janeiro de 1990 a abril de 2007 é de 2,23 l/s, com desvio padrão de 0,67. Nesse caso, o modelo se aproximou bastante da realidade. Vale lembrar que o MVL3 coleta a água do MVL5, MVL6, poços de alívio e tubos de drenagem nas paredes da canaleta.

O coeficiente de correlação entre o MVL3 e o reservatório é de apenas 0,11, o que também fica evidente pela Figura 20. Observando a Figura 43, Figura 51 e Figura 59, percebe-se que há pouca ou nenhuma relação entre o MVL3 e os piezômetros, tanto da argila quanto do solo saprolítico, e medidores de nível de água. A água medida no MVL3 provavelmente é originária de percolação pela argila de fundação, devido ao desnível do próprio terreno, da esquerda para a direita hidráulica. A água deve percolar e ficar armazenada na região compreendida entre as estacas 122 + 00 e 124 + 00, a montante da canaleta de drenagem, sendo lentamente drenada pelos tubos existentes na parede da canaleta. O anexo 13 mostra a seção longitudinal do terreno e o nível de água dos poços de alívio da BTME, em 1990. Os poços de alívio deságuam na canaleta que conduz a água ao MVL3. A Foto 8 mostra os drenos com vazão na parede da canaleta.



Foto 8 – Drenos na parede da canaleta que conduz a água ao MVL3

Por esse motivo não há relação direta entre MVL3 e reservatório, pois mesmo com deplecionamento, o fluxo da esquerda para direita hidráulica devido à topografia do terreno, não se altera significativamente. Além do mais, a água deve ficar armazenada e o fluxo ser suficiente para manter a vazão nos tubos de drenagem. Na Figura 11 e Figura 12, que mostram as regiões de mesma cota piezométrica na fundação, é evidente que há fluxo da esquerda para a direita hidráulica. Se forem traçadas linhas perpendiculares às curvas de mesma cota piezométrica (que nada mais são que equipotenciais em planta), ter-se-ia as linhas de fluxo em planta.

Uma conclusão importante é que apesar dos valores de vazão previstos pelo modelo teórico entre as estacas 123 + 00 e 130 + 50 serem bastante próximos do medido no campo, não se pode afirmar que o modelo represente adequadamente o comportamento do fluxo. O modelo, por ser 2D, só considera fluxo de montante para jusante. E ficou claro que há fluxo considerável da esquerda para a direita hidráulica, decorrente da topografia do terreno de fundação.

7.1.4. MVL 4 e MVL5

Ambos os medidores estão instalados na região da estaca 124 + 00. O MVL5 é um tubo de drenagem no fundo da canaleta, Foto 5. O MVL4 mede a água de um sistema de drenagem no terreno natural, na esquerda hidráulica da estaca 124 + 00, à jusante da pista de rolamento, Foto 4. Analisando a Figura 44

e Figura 45, Figura 52 e Figura 53 e Figura 60 e Figura 61, percebe-se que todas possuem a mesma forma. Logo, conclui-se que o MVL4 e MVL5 medem água da mesma origem, que percola primordialmente pela argila. A conclusão de que a maior percolação se dá pela argila é devida ao fato dos coeficientes de correlação serem maiores para os piezômetros da argila, chegando a 0,7 no caso do MVL4. Os coeficientes de correlação entre MVL4 e MVL5 com o reservatório são, respectivamente, 0,06 e 0,097. Ou seja, não há relação entre variações de nível do reservatório e vazões no MVL4 e MVL5. Por esse motivo, e pela localização desses instrumentos, conclui-se que a origem da água medida pelos mesmos está relacionada ao fluxo da esquerda para a direita hidráulica que se dá da estaca 129 + 00 para a 122 + 00.

7.1.5. MVL6

O MVL6 é um tubo de drenagem existente no aterro compactado, logo acima da saída do filtro da barragem, na estaca 124 + 15. Esse tubo de drenagem foi construído porque foi detectado, ainda na construção, que ficou um material granular no meio do aterro, logo acima da saída dos filtros. Portanto, a água coletada pelo MVL6 é proveniente do aterro compactado. A vazão é muito influenciada pela chuva, pois como o material granular ficou próximo a superfície do terreno, a água de chuva infiltra e é coletada e conduzida ao medidor. A Figura 69 mostra a vazão no MVL6 e a precipitação medida pelo PV2.

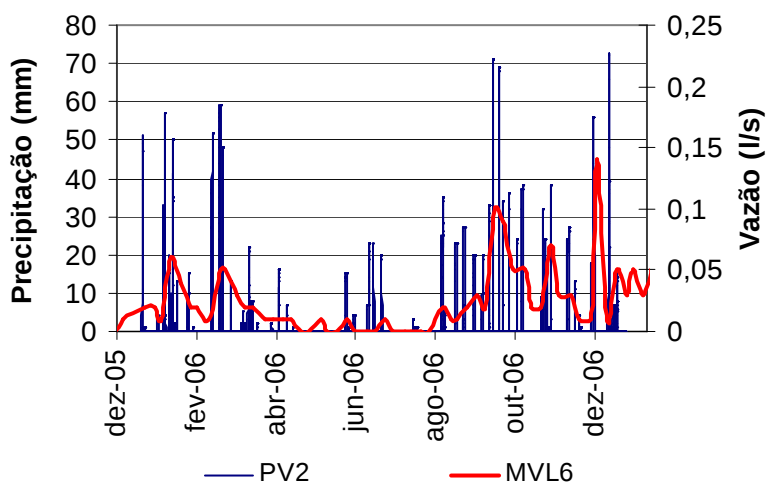


Figura 69– Vazão no MVL6 e Precipitação no PV2

Ao analisar a Figura 69 deve-se ter em mente que as leituras do MVL6 são manuais, com frequência semanal, e não são realizadas em dias de chuva. Já as

leituras do PV2 são automáticas, realizadas a cada 30 min. Contudo, pela forma das curvas, já fica evidente a influência da chuva no MVL6.

Observando a Figura 46, Figura 54 e Figura 62, vê-se que praticamente não há relação entre o MVL6 e piezômetros e medidores de vazão. Isso já era esperado, pois o MVL6 coleta água de uma região à jusante do filtro vertical e acima do tapete drenante. Ou seja, não é provável que água proveniente do reservatório chegue ao MVL6. A conclusão é de que ele mede água de chuva que infiltra no terreno, principalmente na região mais permeável próxima à superfície, que é um nicho de material permeável e existe devido a um lapso na execução da obra.

7.2. Conclusões

A principal conclusão que se tira desse estudo é que praticamente toda a água medida nos medidores de vazão da Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu é proveniente de percolação pelas fundações da barragem. E uma parcela importante da vazão total medida é decorrente do fluxo que ocorre da esquerda para a direita hidráulica, entre as estacas 123 + 00 e 133 + 00 e é abastecido pelo reservatório.

Com relação ao modelo numérico em elementos finitos, não é possível afirmar que ele consiga representar de maneira adequada o comportamento do fluxo pelo corpo e fundações da barragem. Fazendo uma análise apenas das cargas piezométricas, seria admissível que ele representa bem as condições de campo, em função das diferenças entre os valores numéricos e de campo serem inferiores a 1 m na maioria dos piezômetros. Contudo, analisando as vazões, os valores de campo são muito superiores aos previstos. Mesmo que fosse desprezada a vazão do MVL2, que deve ser proveniente de ligação direta com o reservatório, e a do MVL6, que é proveniente de chuva, a vazão total de campo ($MVL1 + MVL3 + MVL4$), considerando a média dos valores de janeiro de 1990 a janeiro de 2007, seria igual a $21,9 + 2,2 + 1,8 = 25,9$ l/s. A vazão total fornecida pelo modelo é de 5,6 l/s, ou seja, 4,6 vezes menor que o real. A melhor maneira de aferir o modelo numérico seria através da comparação da superfície freática do modelo com a real no maciço compactado. Contudo, no caso da BTME isso não é possível. Há apenas um medidor de nível de água no aterro, que é o MVL1, e como já foi exposto no item 7.1.2, não fornece medidas coerentes. Também não há nenhum piezômetro no aterro. Portanto, para avaliar

adequadamente o modelo numérico, seria necessário instalar medidores de nível de água no aterro.

Para a avaliação da segurança de uma barragem de terra, é importante saber a vazão que percola pelo maciço compactado e é coletada pelo sistema de filtros. Essa é a vazão que está relacionada com a capacidade da barragem cumprir sua função, que é armazenar água. Além do mais, é o controle da vazão dessa água, juntamente com a análise de sólidos carregados, que fornece subsídios para a avaliação da integridade do aterro. A configuração atual do sistema de medidores de vazão da BTME não permite a separação da água dos filtros com a água de fundação. Seria importante fazer um pequeno ajuste para que essas vazões fossem separadas. Esse ajuste não seria muito trabalhoso. Na região da estaca 133 + 50 seria necessário construir uma calha na parede de montante da canaleta, para coletar a água que sai do filtro. A vazão dessa calha poderia ser medida com proveta e cronômetro. Dessa forma a vazão medida pelo MVL2 não sofreria alteração e seria possível separar a vazão do bueiro da vazão do filtro.. Na estaca 128 + 80, a canaleta de alívio superior, que coleta a água da estaca 127 + 30 até a 128 + 80, deságua na canaleta de pé da barragem. Seria necessário apenas criar um pequeno funil na saída da água da canaleta superior e medir a água com proveta e cronômetro. Os anexos 11, 12 e 14 mostram o sistema de canaletas da BTME. A Foto 9 mostra a canaleta na estaca 128 + 80.



Foto 9 – Canaleta na estaca 128 + 80

Finalmente, restaria fazer um ajuste semelhante na caixa de passagem existente na estaca 122 + 00 (Foto 10), para medir a água com proveta e cronômetro.



Foto 10 – Caixa de passagem da estaca 122 + 00

Dessa forma, a água que percola pelo filtro entre as estacas 123 + 00 e 127 + 30 seria medida antes de chegar no MVL3.

Com relação à fundação, a região mais crítica é a da estaca 133 + 50, onde deságua o bueiro, em função da elevada vazão. Como já foi discutido, vazões elevadas podem causar problemas em fundações. Essa região merece ser melhor investigada, com a instalação de medidores de nível de água logo à montante da canaleta. O objetivo é identificar a região que está abastecendo o bueiro.

No trecho mais alto da BTME, o filtro não vai até a fundação, o que deixa a região entre o filtro e a fundação desprotegida contra o fenômeno de piping. Contudo, como não há surgência de água no talude de jusante, na região abaixo do filtro, no momento não há preocupação com piping. Caso um dia ocorra surgência nessa região, devem ser tomadas ações rápidas para evitar o início do piping. Como medida imediata nessa situação, podem-se executar furos de drenagem para aliviar a poro-pressão. A água coletada pode ser conduzida ao sistema de canaletas para coleta de águas pluviais existente na barragem. Com relação ao piping pelas fundações desse trecho, também não há preocupação, pois apenas 4 dos 25 poços de alívio apresentam vazão e elas são muito reduzidas. Isso é indício de que não há poro-pressões elevadas na fundação no pé da barragem.

A cada seis meses é emitido um parecer técnico sobre o comportamento da barragem, abordando a análise da instrumentação e as observações das inspeções de campo, que são realizadas semanalmente. Por essas razões, e pela análise realizada na presente dissertação, conclui-se que a BTME apresenta um bom nível de segurança.

Com relação aos objetivos dessa dissertação, o entendimento do fluxo pelo corpo da barragem e fundação foi alcançado. Objetivos secundários, como relacionar chuva e vazão nos medidores e obter valores de controle para as vazões não foram alcançados. Como discutido no item 6.4, não foi possível relacionar adequadamente vazões e precipitações. Um dos motivos é a pequena base de dados. Dados simultâneos de vazão e precipitação só são disponíveis a partir do segundo semestre de 2005, quando houve a automação da instrumentação. Mas o principal motivo provavelmente não é a escassez de dados e sim a qualidade dos mesmos. Seria importante relacionar vazão com intensidade de chuva, não com precipitação. Isso no momento não é possível. Também não se conseguiu obter valores de controle para as vazões medidas. Isso decorre do fato de que, devido ao sistema de drenagem e canaletas atualmente instalado, apenas uma parcela da vazão de infiltração é coletada e medida. Além do mais, as vazões totais medidas, em torno de 45,7 l/s, apesar de não serem o total de infiltração, são muito superiores ao previsto pelo modelo, que é 5,6 l/s. Para tentar obter valores de controle, seria necessário realizar uma modelagem muito mais detalhada, preferencialmente 3D.

Para dar continuidade ao estudo iniciado nessa dissertação, sugere-se elaborar um modelo numérico 3D para avaliar o fluxo pela região da fundação.