



Influência da Permeabilidade no Tempo de Resposta de Diferentes Tipos de Piezômetros na UHE Dona Francisca

Luiz Antônio Bressani

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, lbressani@ufrgs.br

Deise Elise Guerra Favero

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, deisefavero@gmail.com

Eduardo Bonow Simões

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, edusim11@hotmail.com

Camila Dahm Smirdele

Companhia Estadual de Energia Elétrica-GT, Brasil, camila.dahm@ceee.com.br

RESUMO: A poropressão é um dado fundamental na avaliação de diversos problemas geotécnicos, pois está diretamente relacionada com a tensão efetiva do maciço e consequentemente com a resistência ao cisalhamento e rigidez. Muitas obras de grande porte e alto potencial de dano, como barragens de rejeito, possuem apenas a pressão d'água como parâmetro de controle. Uma das formas de se monitorar as pressões d'água existentes em campo é a instalação de piezômetros, que podem apresentar diversas configurações de estrutura, sensores e interfaces de aquisição e transferência de dados. Dessa forma, é importante conhecer a aplicabilidade de cada tipo e suas restrições com relação a durabilidade, manutenção e tempos de resposta. O presente trabalho tem como objetivo discutir os principais tipos de piezômetros e sensores disponíveis no mercado, seus aspectos relativos à instalação, medição e tempos de resposta. Em paralelo, será feita uma breve análise dos piezômetros da UHE Dona Francisca, localizada no estado do Rio Grande do Sul, a qual possui um aparato consolidado de instrumentos que auxiliam no monitoramento do seu comportamento. Ensaios preliminares da permeabilidade do material das fundações apontam para valores inferiores aos encontrados na literatura para esse tipo de rocha, o que implica numa expressiva variação do tempo de resposta. Esta variação, associada ao intervalo de tempo de coleta dos dados, pode levar ao amortecimento dos picos de pressões que ocorrem e não são detectados, acarretando em distorções dos dados disponíveis para a análise.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, Instrumentação, Piezometria, Permeabilidade, Tempo de Resposta.

1 INTRODUÇÃO

Para a maior parte dos problemas geotécnicos, a estimativa da poropressão com alto grau de confiança e precisão não é trivial, principalmente devido à complexidade da formação do solo e da modelagem do comportamento de fluxos d'água sob ação de uma carga externa. A pressão de água, por estar

diretamente relacionada à tensão efetiva, pode causar alterações no comportamento dos maciços, tanto pela variação da resistência ao cisalhamento quanto pela variação da rigidez (BRESSANI, 2009). No tocante a estruturas de barragens, as subpressões presentes nas fundações são elementos importantes na avaliação da estabilidade das estruturas de barramento, visto que seu local de assentamento



é, em maior ou menor proporção, permeável à água acumulada no reservatório. Leliavsky (1965) ressalta que existem dois pontos sensíveis à garantia da integridade da barragem: a percolação de água pode causar a perda de resistência das fundações com características granulares, levando ao colapso da estrutura, e a base da fundação pode sofrer soerguimento devido à pressão hídrica ascendente causada pela percolação de água através do material permeável da fundação (ou redução da força de atrito efetiva). Posto isto, fica evidente a importância da utilização de mecanismos que monitorem as poropressões, principalmente em estruturas de grande porte.

O artigo tem por objetivo apresentar uma breve discussão sobre piezômetros, abordando os principais tipos de equipamentos e sensores disponíveis no mercado, e seus aspectos relativos à instalação, medição e tempo de resposta. Em paralelo, será feita uma discussão sobre a aplicabilidade destes instrumentos na UHE Dona Francisca, que possui uma estrutura robusta de monitoramento em detrimento de seu porte e das características geológicas e geotécnicas de suas fundações.

2 PIEZOMETRIA

A medição da poropressão é feita através de piezômetros, instrumentos capazes de mensurar a carga hidráulica em um ponto de interesse situado no interior de um maciço. Contudo, é comum confundir piezômetros com medidores de nível d'água. Os piezômetros medem a pressão de forma pontual, enquanto os medidores de nível apenas determinam o nível médio de água que chega ao equilíbrio dentro do poço permeável de medição (Bressani, 2009).

Cassan (1980) distingue os piezômetros em duas classes: piezômetros de tubo aberto e piezômetros fechados ou a volume constante. A seguir é feita uma breve discussão de cada um dos tipos.

2.1 Piezômetros de Tubo Aberto

O primeiro grupo, também denominado de Piezômetro de Casagrande, refere-se aos furos que são executados por escavação via trado ou por cravação, em que um determinado trecho do tubo é permeável, permitindo a entrada de água. A pressão de água existente na ponta da entrada do instrumento é equilibrada por uma coluna d'água dentro do tubo de medida, o que implica em uma janela de tempo necessária para que haja o equilíbrio das pressões internas e externas ao tubo. Esse tempo de resposta depende essencialmente da permeabilidade do solo, mas também é influenciado pelo arranjo do instrumento (tamanho do filtro e diâmetro do tubo).

A figura 1 (a) apresenta a estrutura básica de um piezômetro simples com selo de bentonita. Já a figura 1 (b) representa o piezômetro múltiplo que é utilizado para obtenção de carga hidráulica ao longo da profundidade do subsolo, possibilitando a melhor compreensão do gradiente hidráulico. Cassan (1980) também salienta que, para solos de baixa permeabilidade, o tempo de resposta necessário para o equilíbrio de pressões e deslocamento de coluna d'água é muito grande.

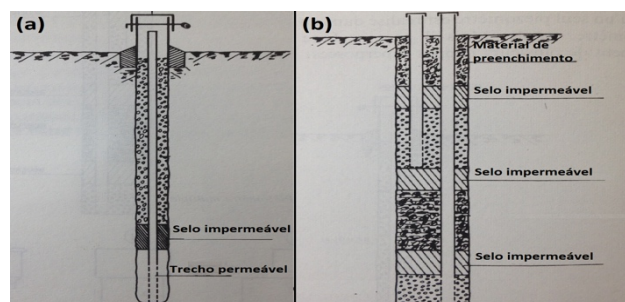


Figura 1. Estrutura básica dos piezômetros de tubo aberto (adaptado de CASSAN, 1980).

Segundo Dunnicliff (1988), a maior limitação desse tipo de piezômetro é a resposta lenta à variação da carga piezométrica, devido ao volume significativo de água que deve fluir para dentro do instrumento para equilibrar as pressões. Esse evento, denominado “*hydrodynamic time lag*”, está relacionado



principalmente à permeabilidade do solo e dimensões do piezômetro. Muitos esforços foram empregados na década de 50 e 60 para estimar o tempo de resposta de piezômetros de tubo aberto, entre eles: Hvorslev (1951), Penman (1960) e Terzaghi e Peck (1967). Para as análises aqui apresentadas, utilizou-se o método de Penman (1960), no qual 90% do tempo de resposta é dado pela função:

$$T = 3,3 \times 10^{-6} \times \frac{d^2 \times \ln \left[\frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{D} \right)^2} \right]}{k \times L} \quad (1)$$

Onde: T = tempo (dias); d = diâmetro interno do tubo (cm); L = comprimento do filtro (cm); D = diâmetro do filtro (cm); k = permeabilidade do solo (cm/s).

O tempo de resposta para solos pouco permeáveis é uma desvantagem e, portanto, uma limitação desse tipo de instrumento. Entretanto, também se deve ter cuidado com o cenário oposto. Conforme descreve Bressani (2009), para solos de alta permeabilidade que apresentam rápida variação da poropressão, as medidas discretas e espaçadas correm o risco de não medir importantes picos de pressão.

A Figura 2 traz um ábaco publicado por Dunncliff (1988) que relaciona o coeficiente de permeabilidade com o tempo de resposta, para alguns tipos de piezômetro.

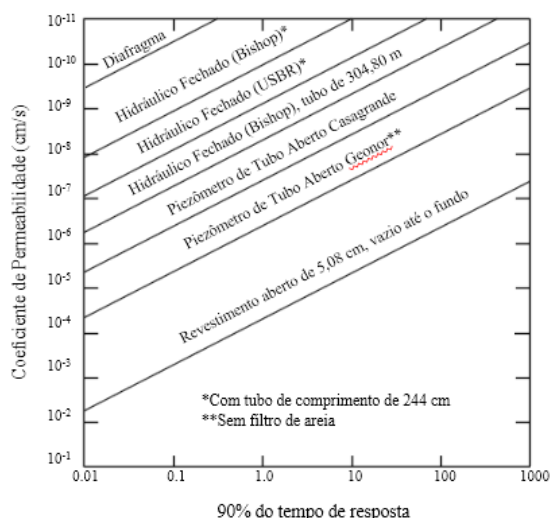


Figura 2. Tempo de resposta de alguns tipos de piezômetros conforme a permeabilidade do solo (adaptado de DUNNICLIFF, 1988).

A instalação destes instrumentos é feita através da execução de um fuste de diâmetro superior ao do tubo de piezômetro, que usualmente varia de 10 a 80 mm. Em seguida, é introduzido um tubo, tipicamente de PVC, com ranhuras na ponta que variam de 0,5 a 0,25 mm, comprimento típico de 50 a 100 cm e fundo tamponado. A abertura das ranhuras é definida em função da granulometria do pré-filtro (material arenoso), de forma a reter 90 a 95% do material.

Já existem no mercado tubos de PVC com filtros incorporados, os quais são fabricados com materiais de baixa entrada de ar e com permeabilidade superior a dez vezes a permeabilidade do solo, como geossintéticos filtrantes. Dunncliff (1988) salienta que os filtros devem ser saturados antes da instalação, já que a imersão dos poros do filtro em água reduz a chance de entupimento e o tempo de resposta é minimizado quando o ar dos poros é removido.

Após a instalação, o tubo é preenchido com uma camada de pré-filtro composta por material granular e selado com material impermeável (usualmente, bentonita), a fim de garantir o isolamento hidráulico. O restante do fuste pode ser preenchido com argamassa pobre. Ressalta-se que se deve tomar cuidado para evitar que a água superficial da chuva infiltre no tubo e distorça as medidas. Para tanto, deve-se utilizar uma tampa apropriada, que proteja o instrumento e garanta que a ventilação do tubo vertical não seja obstruída.

Existem diversos métodos de medição da coluna d'água dentro do piezômetro de tubo aberto. O mais utilizado é o método do "pio" elétrico, que consiste na descida de dois cabos condutores dentro de um invólucro plástico, conectados a uma fita métrica, que quando entram em contato com a água fecham o circuito e acionam um alarme sonoro. Outra solução descrita por Sandroni (1980) é a utilização do som. Primeiramente, coloca-se uma fonte de som próximo da cabeça do piezômetro, e em seguida insere-se um tubo dentro do piezômetro conectado a fones de



ouvidos com marcador de profundidade. Quando o tubo de retorno do som entrar em contato com a coluna d'água, a emissão sonora será interrompida e por consequência será conhecida a profundidade. Um terceiro sistema de leitura, que permite o controle contínuo da medida da cota piezométrica, é o chamado “*Purge Bubble System*”, que basicamente consiste num sistema pneumático de pressão que equilibra com a coluna d'água dentro do piezômetro.

Sistemas mecânicos como utilização de boias conectadas a contrapesos também podem ser utilizados, mas requerem diâmetros mínimos de tubos de 80 mm para serem instalados, o que pode gerar tempos de resposta elevados.

2.2 Piezômetro Fechado ou a Volume Constante

Os piezômetros fechados, ou de volume constante, possuem um tempo de resposta mais rápido, visto que a carga hidráulica é medida através de sensores locais. Cassan (1980) cita uma diversidade de arranjos e estruturas de piezômetros a volume constante, dentre eles piezômetros hidráulicos, de contrapressão, elétricos e acústicos. Esses sensores muitas vezes podem ser instalados dentro de pré-furos realizados por escavação a trado, como mencionado anteriormente, ou cravados diretamente no solo, método denominado de “*Push-in*”.

2.2.1 Piezômetros Hidráulicos e Pneumáticos

Os piezômetros hidráulicos, também conhecidos como piezômetros “*Twin Tubes*”, foram desenvolvidos inicialmente para medição de poropressões nas fundações de diversas barragens. Consiste basicamente em elementos porosos conectados a dois tubos plásticos, por sua vez conectados a manômetros que ficam na superfície. Foram inicialmente desenvolvidos como adaptações de piezômetros de tubo aberto, evoluindo até arranjos mais complexos, sendo muito utilizados em barragens pela

simplicidade e resistência a longos períodos de tempo. A Figura 3 apresenta a ponteira de um piezômetro hidráulico desenvolvido por Bishop e Penman em 1960, na Inglaterra. Os piezômetros pneumáticos também são de fácil concepção, mas estão em desuso pela baixa resistência dos conjuntos de válvulas e diafragmas.

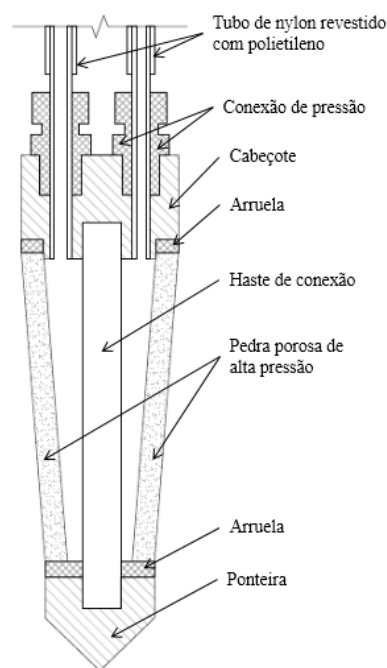


Figura 3. Piezômetro hidráulico (adaptado de DUNNICLIFF, 1988).

2.2.2 Piezômetros de Corda Vibrante

Os piezômetros de corda vibrante são baseados em um diafragma metálico que separa a pressão d'água do sistema de medida. Um fio metálico é preso nas duas extremidades do diafragma e, à medida que a pressão d'água deforma essa estrutura, o fio metálico sofre uma deflexão, que consequentemente gera uma alteração de corrente na bobina de leitura à indução magnética (DUNNICLIFF, 1988). Ressalta-se que as maiores desvantagens e os possíveis erros de medida relativos aos piezômetros de corda vibrante estão relacionados ao referencial zero de medida e à corrosão da corda vibrante. Entretanto, com a evolução tecnológica e o avanço do conhecimento referente aos



componentes e forma de instalação, os piezômetros de corda vibrante são considerados confiáveis e são amplamente utilizados, apresentando durabilidade superior a 10 anos (BRESSANI, 2009).

3 ESTUDO DE CASO

A UHE Dona Francisca é uma das usinas hidrelétricas situadas no Rio Jacuí, localizada entre as cidades de Agudo do Sul e Nova Palma, no centro do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A Usina faz parte da geração de energia do sistema Jacuí, composto pelas UHE Ernestina, Passo Real, Governador Leonel Brizola e Itaúba, e conta com uma capacidade de geração de 125 MW.

A barragem foi construída sobre rochas sedimentares da Formação Caturrita, de tal forma que a concepção do plano de instrumentação concentrou a maior parte dos esforços na fundação da barragem e pouco nas ombreiras, onde se encontram derrames basálticos e, portanto, material de melhor resistência (COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016). Ao todo, o complexo conta com 8 tipos de equipamentos que monitoram seu comportamento: extensômetros múltiplos, medidores de vazão, pêndulos diretos, piezômetros de corda vibrante, piezômetros de tubo aberto e medidores triortogonais de juntas.

O estudo proposto neste artigo abordará apenas o uso dos piezômetros de tubo aberto existentes nas margens da barragem e sob os blocos de fundação do vertedouro.

3.1 Piezômetros de Tubo Aberto da UHE Dona Francisca

O padrão construtivo dos piezômetros de tubo aberto da UHE Dona Francisca é composto por tubos do tipo PVC de $\frac{3}{4}$ ", com ponta perfurada de comprimento de 1,50 m, 4 linhas de furos de 3 mm, espaçados em 25 mm, e fundo tamponado. A ponta perfurada é envolta com

filtro de Bidin OP-30, fixada com fio de nylon. O pré-filtro, executado com areia lavada passada na peneira nº4 e retida na nº8, se estende por 50 cm além da cota superior e inferior da ponta perfurada e o selamento foi feito com calda de cimento rala (relação a/c de 0,5). Para instalação, foram realizados furos de 3" em rocha, com espera de 4" em caso de iniciar em uma camada de solo (como no caso da margem esquerda). A Figura 4 apresenta a estrutura do piezômetro da margem esquerda, que se repete para os demais casos de piezômetros de tubo aberto, alterando-se apenas a profundidade de instalação.

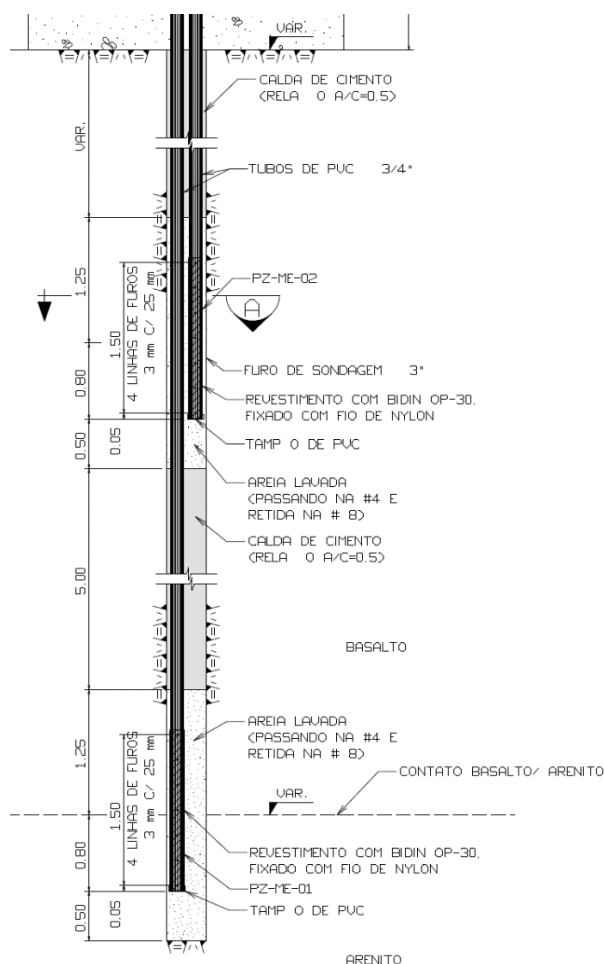


Figura 4. Estrutura dos piezômetros de tubo aberto da UHE Dona Francisca (ENGEVIX, 2001)

3.2 Cálculo dos Tempos de Resposta

Os relatórios de projeto e das primeiras



investigações geotécnicas da usina trazem dois valores de permeabilidade para o arenito da Formação Caturrita presente no local de implantação da barragem, conforme a classificação de Oliveira e Caruso (1981): $1,6 \times 10^{-4}$ e $5,9 \times 10^{-6}$ cm/s. Por sua vez, um estudo publicado em 2003 por Sobrinho et al. estabelece, através de ensaios de campo, valores de permeabilidade do arenito da região 10^{-6} , 10^{-5} e 5×10^{-6} cm/s, conforme a cota de deposição do material. Por se tratar de ensaios de campo, para ambos os casos é possível inferir que se tratam de valores obtidos com amostras submetidas a baixas tensões e que, por consequência, não levam em consideração a tensão à qual o material da fundação da barragem está submetido devido ao peso da estrutura e demais condicionantes. Sendo assim, em 2018 foram retiradas novas amostras indeformadas de um local próximo à usina, caracterizado na época de projeto como semelhante à geologia presente na fundação da barragem, e foram realizados novos ensaios de permeabilidade. Os corpos de prova foram moldados à mão, de forma a manter as estratificações na vertical, paralelas ao fluxo hidráulico imposto pelo ensaio. Essa configuração procura obter uma semelhança ao ensaio de campo, onde usualmente é medida a maior permeabilidade, neste caso horizontal. A Figura 5 mostra o gráfico obtido através dos ensaios e a Tabela 1 traz um resumo dos resultados.

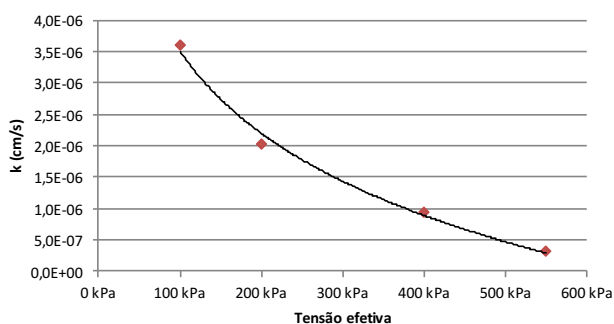


Figura 5. Gráfico da permeabilidade em função da tensão efetiva para o CP moldado com as estratificações na vertical.

Tabela 1. Resumo dos resultados do ensaio de permeabilidade do CP moldado com as estratificações na vertical.

Tensão (kPa)	Permeabilidade (cm/s)
100	$3,59 \times 10^{-6}$
200	$2,02 \times 10^{-6}$
400	$9,46 \times 10^{-7}$
550	$3,13 \times 10^{-7}$

Percebe-se que, a uma tensão efetiva de 100 kPa, o valor do coeficiente de permeabilidade do material está dentro da faixa de valores considerados no projeto da barragem. Contudo, esse valor cai conforme há um aumento da pressão confinante efetiva. Dessa forma, o cálculo do tempo de resposta foi feito a partir dos coeficientes de permeabilidade definidos em projeto e com o valor obtido para a maior tensão de ensaio, para fins de comparação. A Tabela 2 traz um resumo dos tempos de resposta obtidos, tomando-se como referência os aspectos construtivos mostrados na Figura 4.

Tabela 2. Resumo dos tempos de resposta dos piezômetros de tubo aberto calculados para diferentes permeabilidades.

Permeabilidade (cm/s)	T (dias)	T (horas)	T (minutos)
$1,6 \times 10^{-4}$	0,0012	0,03	1,77
10^{-5}	0,0197	0,47	28,30
5×10^{-6}	0,0393	0,94	56,60
10^{-6}	0,1965	4,72	282,98
$3,13 \times 10^{-7}$	0,6279	15,07	904,10

A fórmula proposta por Penman (1960) não leva em consideração a anisotropia do material. Além dos ensaios realizados com os corpos de prova moldados com as estratificações na direção vertical, foram realizados também ensaios com corpos de prova moldados com as estratificações na direção horizontal, perpendiculares ao fluxo hidráulico. A Figura 6 mostra o gráfico dos resultados obtidos e a Tabela 3 traz um resumo dos resultados.

Os dados obtidos mostram uma diferença expressiva no comportamento da permeabilidade do material quando submetido a diferentes tensões, e também quando comparado aos ensaios do CP moldado com as



estratificações na vertical. Neste caso, a permeabilidade cai conforme o aumento de tensão, mas tende a estabilizar. A diferença entre as permeabilidades obtidas em ambos os ensaios para a tensão de 550 kPa é da ordem de 7 vezes. Neste nível de tensões, o tempo de resposta do piezômetro aumenta para aproximadamente cinco dias.

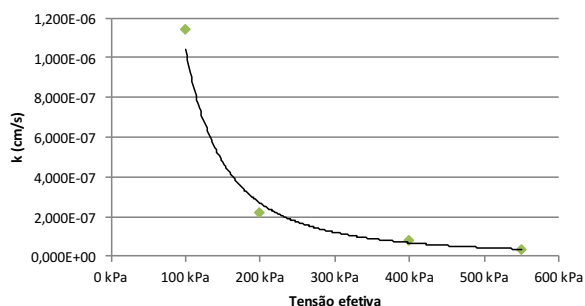


Figura 6. Gráfico da permeabilidade em função da tensão efetiva para o CP moldado com as estratificações na horizontal.

Tabela 3. Resumo dos resultados do ensaio de permeabilidade do CP moldado com as estratificações na horizontal.

Tensão (kPa)	Permeabilidade (cm/s)
100	$1,12 \times 10^{-6}$
200	$2,19 \times 10^{-7}$
400	$8,33 \times 10^{-8}$
550	$4,28 \times 10^{-8}$

3.2 Análise dos Dados dos Piezômetros de Tubo Aberto da UHE Dona Francisca

Os dados dos piezômetros de tubo aberto da UHE Dona Francisca, em sua maioria, apresentam uma tendência de estabilização dos valores de poropressão ao longo de sua operação. A exceção é pontuada pelo PZ-TA-04, localizado na ombreira direita da barragem, que apresenta grandes variações em suas medições, com oscilação significativa e sem relação direta com a variação do nível d'água, conforme mostrado na Figura 7. Este instrumento indica também cotas piezométricas que ultrapassam os níveis máximos do reservatório, inferindo-se que pode existir infiltração da água da chuva ou subinfiltrações provenientes do maciço da própria ombreira, sem relação direta com o reservatório. Por outro lado, o PZ-TA-03, também instalado na ombreira direita, apresenta uma tendência de estabilização, e pode-se observar que os picos registrados estão relacionados a picos medidos também no nível do reservatório, conforme mostrado na Figura 8.

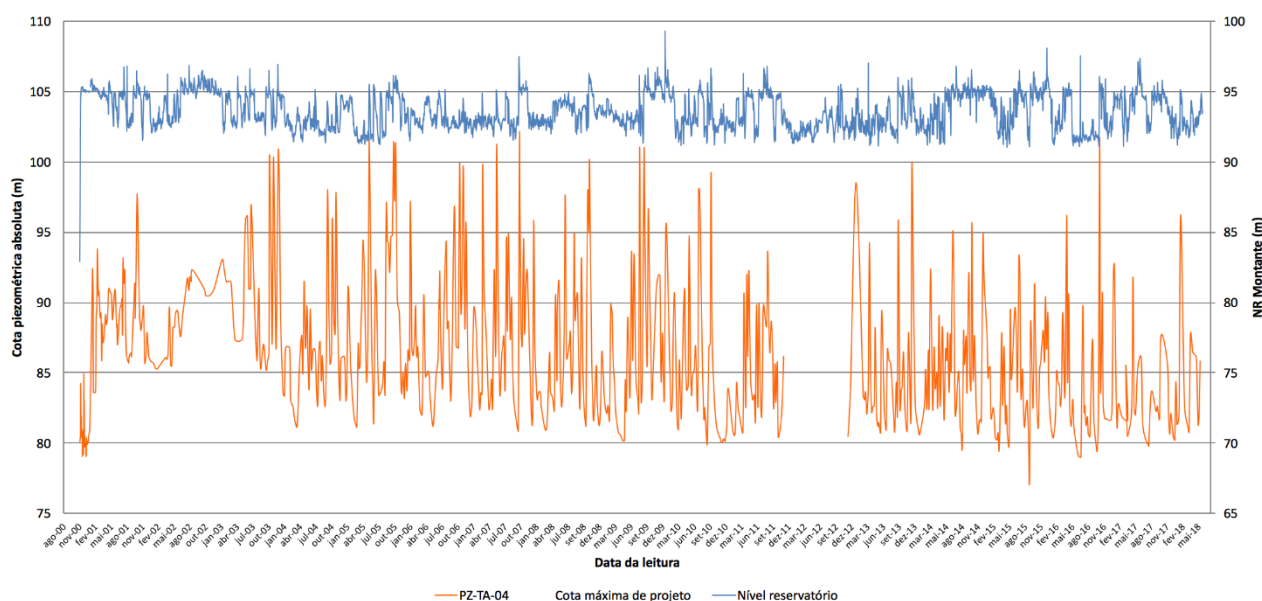


Figura 7. Análise dos dados do piezômetro de tubo aberto PZ-TA-04 da ombreira direita.



Os piezômetros de tubo aberto localizados ao longo do vertedouro, assentado predominantemente sobre o material de arenito para o qual foram realizados os ensaios de permeabilidade, e que estão submetidos a maiores tensões, também se apresentam estabilizados. O gráfico da Figura 9 mostra os dados do piezômetro PZ-BV48AP, localizado no bloco 17 do vertedouro. Ele apresenta uma oscilação mais suave quando comparado aos piezômetros PZ-TA-03 e 04 da ombreira direita,

mas é possível ver uma relação direta entre seus picos e os picos do nível do reservatório.

O tempo de resposta do equipamento se mostra adequado para as medições realizadas, onde é possível constatar a influência da variação do nível do reservatório nas poropressões observadas.

Os dados das medições dos piezômetros também demonstram o fato de que, em um solo anisotrópico, o comportamento do fluxo hidráulico é regido pela permeabilidade de maior valor.

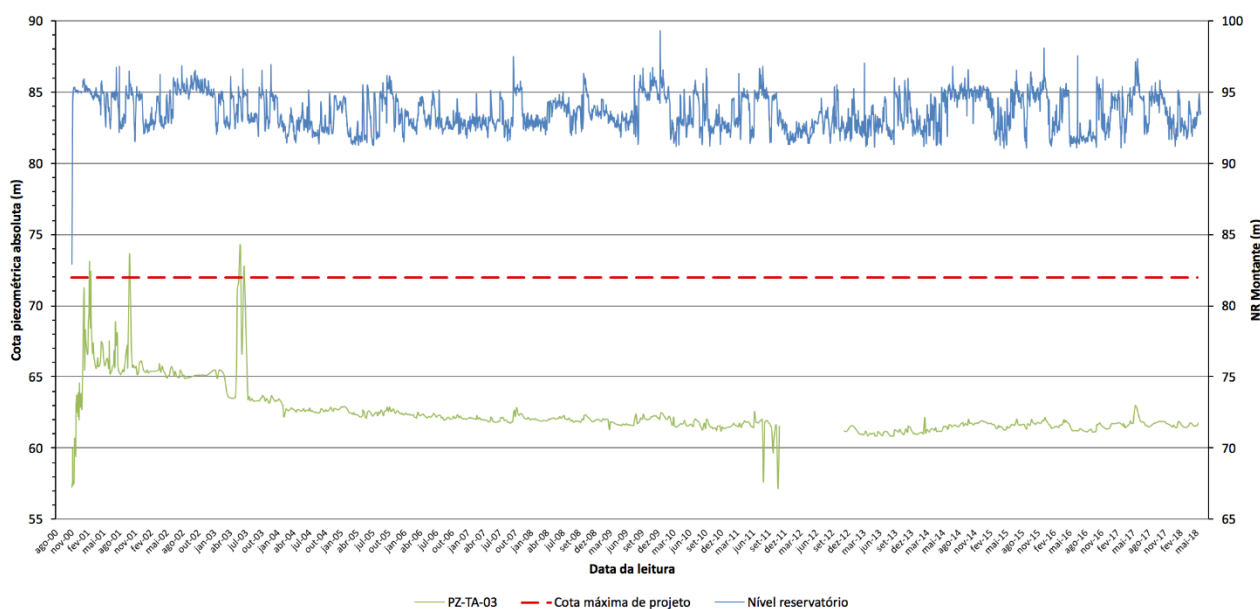


Figura 9. Análise dos dados do piezômetro de tubo aberto PZ-TA-03 da ombreira direita.

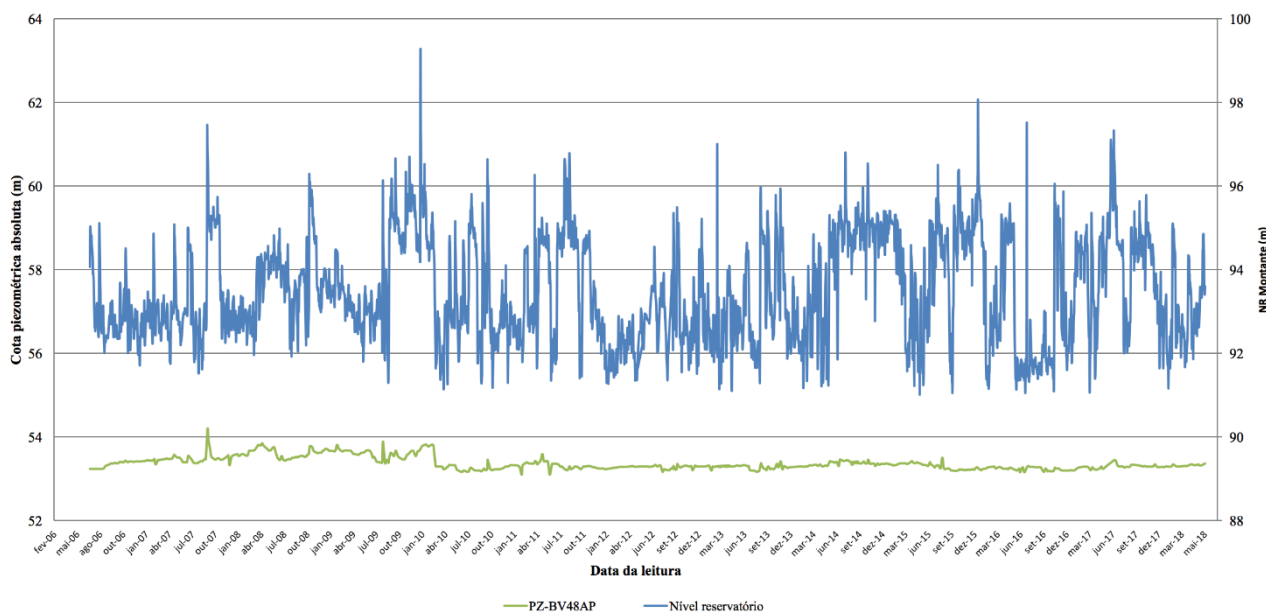


Figura 8. Análise dos dados do piezômetro de tubo aberto PZ-BV48AP (inf) do bloco 17 do vertedouro.



4 DISCUSSÕES

No caso da UHE Dona Francisca, que possui uma fundação predominantemente caracterizada por rochas de arenito com permeabilidade considerada média, é possível utilizar piezômetros de tubo aberto. O tempo de resposta encontrado para as maiores tensões de ensaio, de aproximadamente 15 horas, parece adequado para identificar picos de poropressão em função da oscilação do nível d'água do reservatório.

Contudo, é válido ressaltar os cuidados necessários à sua implantação e a influência das tensões a qual o material está submetido no coeficiente de permeabilidade. Os ensaios mostram que, a tensões maiores, o coeficiente de permeabilidade pode cair expressivamente.

No caso da amostra moldada com as estratificações horizontais, perpendiculares ao fluxo hidráulico do ensaio, a razão entre as permeabilidades medidas com baixa e mais alta pressão ultrapassa o valor de 25 vezes. Essa diferença tem influência direta no tempo de resposta dos piezômetros de tubo aberto que podem acarretar em falhas de monitoramento. A demora no tempo de resposta pode fazer com que picos de poropressão nas camadas menos permeáveis não sejam identificados, visto que não há tempo suficiente para equilibrar as pressões antes de uma nova alteração no regime hidráulico. Neste caso, o resultado das medições acaba por representar apenas uma média dos valores de poropressão, onde os picos são suavizados.

Este cenário se torna ainda mais crítico no contexto de materiais com grande anisotropia, como rejeitos de mineração. Usualmente, as barragens de rejeito possuem uma variabilidade muito grande na permeabilidade dos materiais depositados. Embora esse tipo de barragem possua em sua instrumentação piezômetros de tubo aberto, o mais indicado seria a utilização de piezômetros fechados ou a volume constante, para os quais o tempo de resposta das poropressões é muito pequeno.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os piezômetros são instrumentos fundamentais para a previsão do comportamento de maciços e obras geotécnicas. A aplicabilidade de piezômetros de tubo aberto é adequada quando utilizados em solos de permeabilidade intermediária à alta, devido ao baixo tempo de resposta. Para locais com materiais de baixa permeabilidade, que implica em tempos de resposta bastante altos, é necessário avaliar o uso de piezômetros fechados. Ademais, é importante salientar a influência das tensões as quais o material está submetido na sua permeabilidade. A utilização inadequada dos instrumentos de monitoramento pode acarretar em dados que não refletem o real comportamento da estrutura, levando a uma compreensão incorreta dos fenômenos que ali ocorrem, e prejudicando o controle e gerenciamento da operação destas estruturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do CNPq, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI), à CEEE e à DFESA (Dona Francisca Energética SA).

REFERÊNCIAS

- Bressani, L.A. (2009). Instrumentação em obras geotécnicas, Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encosta, COBRAE, ABMS, São Paulo, v.1, p. 3-18.
- CASSAN, M. (1980). *Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols*, 1 ed., Eyrolles, Paris, 275 p.
- COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2016). Manual do Ckeck-List – Revisão 01, IV Manual de Procedimento de Inspeção de Dona Francisca, Porto Alegre.
- DUNNICLIFF, J. (1988). *Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performance*, 1 ed., John Wiley and Sons, New York, 563 p.
- ENGEVIX (2001). Projeto da Barragem e Vertedouro –



- Instrumentação do piezômetro de tubo na seção S7,
Prancha 8447/BP-3G-A1-0096-A.
- HVORSLEV, M.J. (1951). Time lag and soil permeability in ground water observations, *Miss US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station*, Bulletin, Vicksburg, p 36-50.
- LELIAVSKY, S. (1965). *Design of dams for percolation and erosion*, Chapman and Hall LTD, London, 285 p.
- OLIVEIRA, J.E.; CARUSO, L.G. (1981). Contribuição ao conhecimento atual de características tecnológicas de rochas sedimentares em alguns estados brasileiros, III Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, São Paulo, v.3, p. 221-223.
- PENMAN, A.D.M. (1960). A study of the response times of various types of piezometers, *Proc. Conf. on Pore Pressure and Suction in Soils*, Butterworths, London, p. 53-58.
- SANDRONI, S.S.A. (1980). Simple, Accurate and Fault-Proof Water Level Indicator, *Géotechnique*, Vol. 30, n°03, p. 319-320.
- SOBRINHO, J.A.; FERNANDES, A.M.; BASSO, S.P.; PEREIRA, R.F.; SILVA, L.B.; FOES, P.A. (2003). Critical conditions of seepage under RCC dam on permeable foundation: the case of the Dona Francisca Dam, *Seventh Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, Proceeding ICOLD, Bucharest, Romania, p. 420-427.
- TERZAGHI, K.; PECK, R.B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York.