

# Avaliação de teste de equalização de carga hidráulica em instrumentos piezométricos de tubo aberto pelo método de Hvorslev

Anderson Gonçalves de Azevedo

Engenheiro Geotécnico, Samarco, Santa Bárbara-MG, Brasil, anderson95azevedo@gmail.com

Agatha Ribeiro Hauck

Engenheira Geotécnica, Samarco, Santa Bárbara-MG, Brasil, agatha.hauck@gmail.com

João Victor Oliveira Badaró

Samarco, Mariana MG, Brasil, j.victorbadaro@gmail.com

André Gonçalves de Azevedo

Engenheiro Geotécnico, Vale, Santa Bárbara-MG, Brasil, andre56azevedo@gmail.com

Sabrina Toledo de Souza

Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto-MG, Brasil, sabrinatoledo99@yahoo.com.br

**RESUMO:** Com o crescente movimento de instrumentação piezométrica das estruturas geotécnicas no Brasil nos últimos anos e a busca de maior confiabilidade nas leituras de poropressão, os testes de equalização de carga hidráulica se mostram essenciais para validação de campanhas de instalação e performance dos instrumentos ao longo da sua vida útil. Esse trabalho sugere a verificação da integridade de seis instrumentos piezométricos instalados em uma pilha de estéril através da metodologia sugerida por Hvorslev (1951), em que o tempo de resposta é função da camada de assentamento da célula drenante e das características geométricas do instrumento piezométrico. Os valores de equalização hidráulica obtidos pelo método são apresentados para as condições de contorno adotadas, bem como a eficiência de ensaio para carga hidráulica variável. Diante dos resultados obtidos na campanha de ensaios de equalização, foi verificado quais instrumentos apresentavam recuperação de até 90% em um tempo inferior a 24 horas, tendo metade dos instrumentos avaliados com performance adequada e tempo de resposta classificado como rápido e a outra metade com indicativos de má funcionalidade e tempo de resposta classificado como extremamente lento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Teste de equalização, Carga Hidráulica, Piezômetro, Integridade.

**ABSTRACT:** With the growing movement of piezometric instrumentation in geotechnical structures in Brazil in recent years and the quest for greater reliability in pore pressure readings, hydraulic load equalization tests are essential for validating installation campaigns and instrument performance throughout their service life. This work suggests verifying the integrity of six piezometric instruments installed in a waste pile using the methodology proposed by Hvorslev (1951), where the response time is a function of the settlement layer of the draining cell and the geometric characteristics of the piezometric instrument. The hydraulic equalization values obtained by the method are presented for the adopted boundary conditions, as well as the test efficiency for variable hydraulic load. Based on the results obtained in the equalization test campaign, it was verified which instruments showed recovery of up to 90% in less than 24 hours, with half of the evaluated instruments showing adequate performance and classified response time as fast, while the other half exhibited signs of poor functionality and classified response time as extremely slow.

**KEYWORDS:** Equalization Test, Hydraulic Load, Piezometer, Integrity.

## 1 INTRODUÇÃO

A instrumentação piezométrica permite a avaliação das pressões neutras que se desenvolvem nas estruturas geotécnicas. O acompanhamento de suas leituras auxilia na avaliação da performance de barragens, pilhas, cavas, taludes naturais, dentre outros, sendo imprescindível na gestão de segurança desses. Nesse sentido, a garantia da confiabilidade das leituras de Piezômetros de Tubo Aberto ou Casagrande decorre de uma análise periódica de sua operacionalidade. Tal garantia deve ser tomada como parte da gestão da qualidade da instrumentação, amplamente discutida nos conceitos de QA/QC (Garantia da Qualidade e Controle da Qualidade - Quality Assurance and Quality Control) da instrumentação geotécnica.

A verificação da integridade dos piezômetros de tubo aberto se faz necessária desde a sua instalação e sua ocorrência periódica é realizada pelos chamados “Testes de vida”. Esses testes permitem cercar eventuais problemas que ocorram no instrumento ao longo de sua vida útil, podendo comprometer a confiabilidade das leituras. Entre os problemas comumente identificados em piezômetros de tubo aberto, Silveira (2006) cita alguns exemplos: obstrução do tubo pela queda de objetos, obstrução do tubo por cisalhamento no interior do maciço, colmatagem dos orifícios do tubo ou do material drenante, perfuração do tubo de aço por oxidação e ruptura do tubo plástico.

Diante do desafio de garantir leituras piezométricas representativas, o presente artigo visa apresentar uma breve revisão bibliográfica sobre o tema, além de avaliar através da metodologia proposta por Hvorslev a integridade de seis instrumentos piezométricos instalados em uma pilha de estéril.

## 2 EQUALIZAÇÃO HIDRÁULICA: FUNCIONALIDADE DO PIEZÔMETRO DE TUBO ABERTO

Durante a realização dos “Testes de vida” nos instrumentos de tubo aberto são observadas as repostas dos instrumentos à aplicação de cargas ou recargas hidráulicas, verificando a tendência de eliminação das diferenças de pressões hidrostática no tempo. Conceito entendido como equalização de carga.

Ensaio realizados em solos ou rocha adjacentes, que têm como princípio a observação da permeabilidade do material do entorno do bulbo drenante, podem ser classificados em ensaios a nível constante ou variável. Nos ensaios em nível variável, adiciona-se água no tubo do instrumento, fazendo com que o nível da água natural (ou original) se altere para uma posição denominada nível inicial do ensaio. A tendência de o nível da água retornar à posição original é acompanhada ao longo do tempo de ensaio. Já os ensaios em nível constante, por sua vez, são realizados através da manutenção do nível da água numa posição constante ao longo de toda duração do ensaio, podendo ser realizados através da introdução de água (ensaio de infiltração) ou da retirada de água (ensaio de bombeamento). (Oliva, Andressa; Kiang, Chang; Chang, Maria, 2005).

A avaliação da funcionalidade de piezômetros Casagrande é habitualmente realizada a partir de ensaios de equalização de carga hidráulica em nível variável, sendo a condição de nível constante menos usual por conta da dificuldade de operacionalização do ensaio. A execução do ensaio passa pela adição, remoção ou deslocamento de volume de água. A Figura 1 mostra o desenho esquemático dos ensaios de equalização “Slug test” e “Bail Test”.

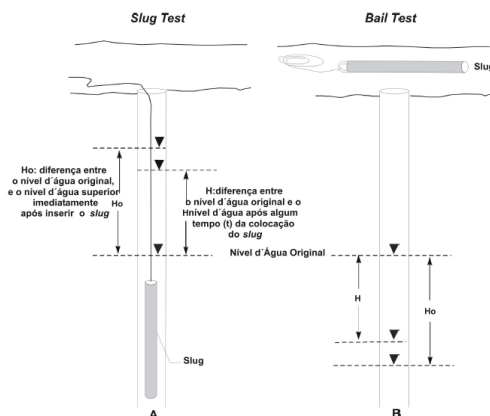


Figura 1 – Representação esquemática dos ensaios de equalização Slug Test (A) e Bail Test (B). (Oliva, Andressa; Kiang, Chang; Chang, Maria, 2005)

A Figura 2 mostra a execução de “Teste de vida” em um instrumento piezométrico do tipo Tubo Aberto com adição de água.



Figura 2 – Execução de Teste de Vida em piezômetro.

O acompanhamento da variação do nível d’água (NA) durante os intervalos de tempo estabelecidos no ensaio gera uma representação gráfica que ilustra o declínio ou aumento do NA em função do tempo. A análise da relação entre o nível da água e o tempo pode ser realizada utilizando as abordagens propostas por Hvorslev (1951).

## 2.1 Método de Hvorslev (1951) para avaliação dos testes de equalização

Para avaliação dos testes equalização Hvorslev (1951) define, em fins práticos, o tempo necessário para eliminação das diferenças entre as pressões hidrostáticas dentro do instrumento piezométrico (Figura 4) como tempo de retardo básico (*basic time lag*).

Para determinação do tempo de retardo, Hvorslev (1951) assume que a Lei de Darcy é válida, ou seja, que a velocidade do fluxo é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico, que o solo é incompressível, e que o fluxo para a equalização não causa nenhum rebaixamento do lençol freático, chegando a seguinte equação diferencial básica:

$$\frac{dy}{z-y} = \frac{dt}{T} \quad (1)$$

Onde a  $dy/dt$  representa a variação infinitesimal de carga no tempo,  $T$  o tempo de retardo e  $(z-y)$  a variação de carga no tempo  $t$  (Figura 3).

Soluções para essa equação são realizadas considerando a linha freática constante ( $z = H_0$ ) e variável ( $z = H_0 + \alpha T$ ). Para a adoção da linha freática constante, constituinte do presente trabalho, tem-se:

$$\frac{dy}{H_0-y} = \frac{dt}{T} \quad (2)$$

Em que  $H_0$  se refere ao nível d’água no início do ensaio ( $t=0$ ).

Desenvolvendo matematicamente a equação 2 para diferentes tempos:

$$\frac{t}{T} = \ln \frac{H_0}{H_1} = \ln \frac{H_1}{H_2} = \ln \frac{H_2}{H_3}, \text{ etc.} \quad (3)$$

Por conseguinte:

$$\frac{H_0}{H_1} = \frac{H_1}{H_2} = \frac{H_0 - H_1}{H_1 - H_2} = \frac{h_1}{h_2} \quad (4)$$

Das equações apresentadas acima Hvorslev (1951) conclui que o tempo de retardo básico corresponde à relação de equalização de 0,63. Sendo considerado adequado o uso prático da relação de equalização igual a 0,90 e corresponde a um desfasamento temporal igual a 2,3 vezes o tempo de retardo básico. Uma taxa de equalização de 0,99 requer o dobro do tempo que uma equalização de 90 por cento.

Segundo Castro et al. (2016), as equações também são válidas para condições de permeabilidade anisotrópica quando utilizando valores médios ou equivalentes dos fatores de forma e permeabilidade.

A Figura 3 apresenta o desenho esquemático utilizado para melhor compreensão dos conceitos de equalização propostos por Hvorslev (1951).

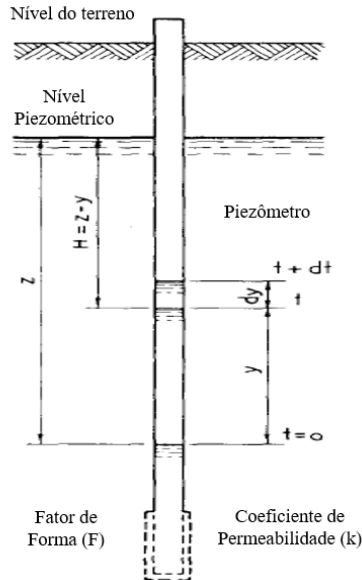


Figura 3 – Desenho esquemático de equalização carga hidráulica. (Adaptado de Hvorslev, 1951).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho contemplou a realização de equalização de carga hidráulica (“testes de vida”) para dois Indicadores de nível d’água e quatro piezômetros instalados em uma pilha de estéril. A Figura 4 indica a pilha em estudo, bem como a região de instalação desses instrumentos.



Figura 4 – Região com locação dos instrumentos.

A Tabela 1, por sua vez, resume informações topográficas sobre os instrumentos analisados.

Tabela 1. Informações cadastrais dos instrumentos

Instrumento	TAG	Cota Célula Base (m)	Cota Terreno (m)	Cota Topo Tubo (m)	Profundidade (m)
Piezômetro 1	PI001	326,66	338,95	339,63	12,98
Piezômetro 2	PI002	332,19	344,81	345,4	23,21
Piezômetro 3	PI003	331,77	339,11	339,74	7,97
Piezômetro 4	PI004	329,81	344,79	345,4	15,59
Indicador de Nível D'água 1	LI001	331,59	339,07	339,45	7,89
Indicador de Nível D'água 2	LI002	329,82	344,79	345,4	15,58

Visando classificar a operacionalidade dos instrumentos analisados, utilizou-se o critério de classificação elaborado por Furnas (2015), na qual se baseia no valor do tempo de resposta obtido, conforme orienta a Tabela 2.

Tabela 2. Classes de tempo de respostas adotadas

Tempo de resposta para 90% de recuperação	Classificação
De 0,00 minuto a 1,00 minuto	Instantâneo
De 1,01 minuto a 600 minutos (10 horas)	Rápido
De 601 minutos a 10080 minutos (uma semana)	Lento
Acima de 10081 minutos (uma semana)	Extremamente Lento

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 apresenta os resultados dos ensaios dos testes de equalização plotados em escala semilogarítmica, na qual o eixo das abcissas indicou o tempo e o eixo das ordenadas indica a relação  $\Delta H/\Delta H_0$ , onde  $\Delta H$  é o excesso de carga no instante  $t$  (correspondente a cada leitura) e  $\Delta H_0$  é o excesso de carga inicial, acrescida no instante  $t_0$ .

A Tabela 3 apresenta os resultados dos tempo de resposta obtidos nos ensaios de equalização dos instrumentos. Com base nos tempos de respostas foram classificadas aplicando os critérios de Furnas (2015).

Tabela 3. Relação de instrumentos analisados neste estudo.

Instrumento	NA Estático (m)	Equalização 24h (%)	Tempo de resposta 90% (min)	Classificação	Status
PI001	12,97	100%	233,98	Rápido	Operante
PI002	23,21	86,90%	>1440	Extremamente Lento	Inativado
PI003	7,23	77,50%	>1440	Extremamente Lento	Inativado
PI004	15,59	100%	343,81	Rápido	Operante
LI001	7,86	70,20%	>1440	Extremamente Lento	Inativado
LI002	15,58	97,30%	55,2	Rápido	Operante

Da Tabela 3, tem-se que metade dos instrumentos apresentaram performance adequada, com tempo de resposta classificado como rápido e a outra metade apresentou indicativos de má funcionalidade, com tempo de resposta classificado como extremamente lento.

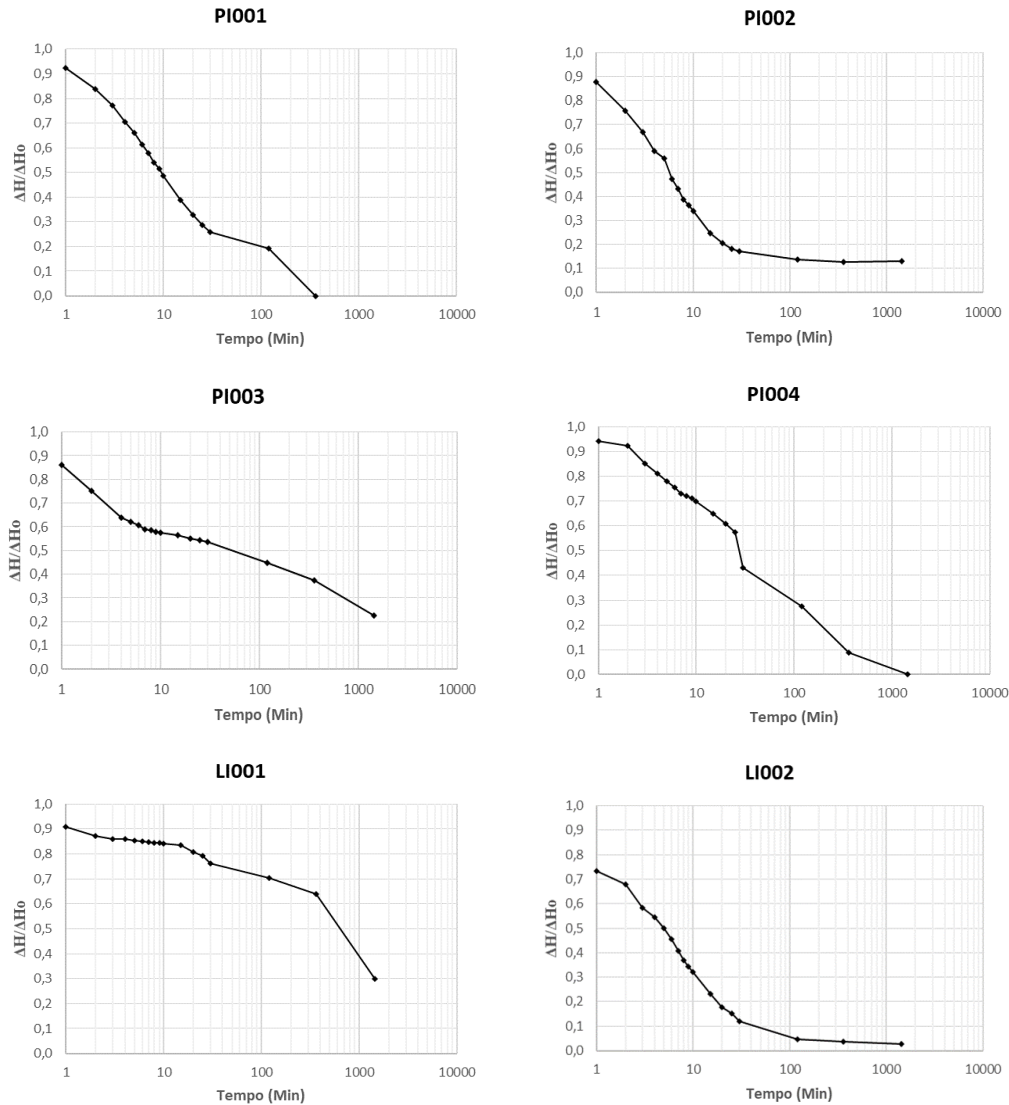


Figura 5 – Resultados ensaios de equalização.

## 5 CONCLUSÃO

De posse da campanha de ensaios de equalização realizada

A análise das curvas dos testes de equalização permite concluir que os instrumentos PI002, PI003 e LI001 apontam um comportamento inadequado, com recuperação mais lenta que os demais. Além disso, esses instrumentos não atingiram a recuperação de 90% em 24 horas, valor de referência indicado pela literatura e utilizado como referência para o presente trabalho.

Para os casos em que os resultados indiquem recuperação tardia, recomenda-se que sejam realizadas limpeza e novas verificações de equalização. Caso a lavagem não seja eficaz, faz-se necessário a instalação de novos instrumentos nas proximidades a fim melhor avaliar a condição constatada.

Por fim, sugere-se para trabalhos futuros o confronto com outras metodologias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTRO, Marcus Divino de et al. *Critérios para avaliação da operacionalidade dos piezômetros de tubo aberto instalados na barragem de terra-enrocamento da UHE Furnas*. Instituto idd - construindo conhecimento, 2016.
- FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS, *UHE Furnas e Barragem Auxiliar de Piumhi – Ensaios de equalização nos piezômetros de tubo aberto e medidores de nível d'água e ensaio de tempo de estabilização em piezômetro com leitura manométrica*. Relatório GST.E.056.2015-R0, Aparecida de Goiânia, 2015.
- HVORSLEV, M. J., *Time lag and soil permeability in ground-water observation*. Bulletin nº 36, Waterways Experiment Station Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, 1951.
- SILVEIRA, J. F. A. *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento*. São Paulo: Oficina, 2006.
- OLIVA, ANDRESA, CHANG HUNG KIANG, AND MARIA RITA CAETANO-CHANG. *Determinação da condutividade hidráulica da Formação Rio Claro: análise comparativa através de análise granulométrica e ensaios com permeâmetro guelph e testes de slug*. Águas subterrâneas, 2005.