

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/448

Avaliação dos Tempos de Resposta em Piezômetros Casagrande: Estudo de Caso em uma Barragem de Rejeitos em Itabira, MG

Hyllttonn W. D. Bazan

Gerente Técnico, Vale S.A., Nova Lima, Brasil, h.bazan@vale.com

José Adriano Cardoso Malko

Engenheiro Geotécnico, Vale S.A., Nova Lima, Brasil, malko@vale.com

Samuel Souza Silva

Engenheiro Mecânico, Vale S.A., Itabira, Brasil, samuel.souza.silva@vale.com

RESUMO: O artigo em questão discute a avaliação dos tempos de resposta de piezômetros Casagrande, instalados em uma barragem de rejeitos localizada em Itabira, Minas Gerais. A avaliação desses tempos de resposta é essencial para um monitoramento geotécnico efetivo, fornecendo percepções significativas sobre as condições hidráulicas do local. O estudo se concentra na obtenção desses tempos de resposta por meio da realização de ensaios de permeabilidade in situ, especificamente infiltração e rebaixamento conduzidos nos piezômetros Casagrande. No Brasil, esses ensaios são comumente referidos como 'testes de vida'. A metodologia adotada envolve a aplicação de ensaios de permeabilidade in situ específicos para determinar os tempos de resposta dos piezômetros Casagrande. Esses ensaios in situ permitem a obtenção de dados sobre a permeabilidade do solo, de acordo com a formulação de Horzlev (1951) baseada na Lei de Darcy e, consequentemente, nos tempos de resposta dos piezômetros Casagrande com a equação de Penman (1960). Isso proporciona a avaliação da confiabilidade dos tempos de resposta obtidos por meio dos testes em campo. Um aspecto notável do estudo é a relevância dessas informações para o dimensionamento das taxas de coleta de dados, especialmente em contextos onde os piezômetros Casagrande são automatizados através de sensores. A avaliação dos tempos de resposta obtidos oferece percepções valiosas para otimizar a coleta de dados automatizada. Isso é importante para garantir a eficiência do monitoramento geotécnico, pois permite ajustar as frequências de coleta de dados de acordo com as características específicas da barragem de rejeitos em análise.

PALAVRAS-CHAVE: Piezômetros Casagrande, Barragens de Mineração, Tempo de Resposta

ABSTRACT: The article in question discusses the evaluation of response times of Casagrande piezometers, installed in a tailings dam located in Itabira, Minas Gerais. The evaluation of these response times is essential for effective geotechnical monitoring, providing significant insights into the hydraulic conditions of the site. The study focuses on obtaining these response times through the performance of in situ permeability tests, specifically infiltration and drawdown conducted in the Casagrande piezometers. In Brazil, these tests are commonly referred to as 'life tests'. The adopted methodology involves the application of specific in situ permeability tests to determine the response times of the Casagrande piezometers. These in situ tests allow the acquisition of data on soil permeability, according to the formulation of Horzlev (1951) based on Darcy's Law and, consequently, on the response times of the Casagrande piezometers with the Penman equation (1960). This provides an evaluation of the reliability of the response times obtained through field tests. A notable aspect of the study is the relevance of this information for the sizing of data collection rates, especially in contexts where the Casagrande piezometers are automated through sensors. The evaluation of the obtained response times offers valuable insights to optimize automated data collection. This is important to ensure the efficiency of geotechnical monitoring, as it allows adjusting data collection frequencies according to the specific characteristics of the tailings dam under analysis.

KEYWORDS: Casagrande Piezometers, Mining Dams, Response Time

1 INTRODUÇÃO

A Resolução ANM N° 95 (ANM, 2022) estabelece a obrigatoriedade de um sistema de monitoramento automatizado de instrumentação para barragens de mineração com alto Dano Potencial Associado (DPA). Essa medida visa garantir a segurança das estruturas, possibilitando a identificação precoce de problemas e a tomada de decisões assertivas.

O monitoramento geotécnico com piezômetros Casagrande é fundamental para a segurança de barragens de mineração. A agilidade na resposta dos piezômetros permite a identificação antecipada de problemas, possibilitando ações corretivas imediatas. A seleção adequada do piezômetro e a consideração dos fatores que influenciam o tempo de resposta são fundamentais para a efetividade do monitoramento.

Para avaliar a efetividade do monitoramento piezométrico na Barragem de Itabiruçu, em Minas Gerais, duas campanhas de testes de permeabilidade in situ foram realizadas em 2020 e 2022. A barragem apresenta uma complexa caracterização geotécnica, com diferentes tipos de solo e rocha em sua fundação e aterro.

A compreensão das características geológicas e geotécnicas da Barragem de Itabiruçu é fundamental para a análise dos tempos de resposta dos piezômetros. A fundação da barragem é composta por colúvio, solo residual de gnaiss e xisto, saprólito de gnaiss e xisto, e gnaiss e xisto alterados e são. Já o maciço da barragem é composto por um aterro de textura silto-argilosa a argilo-siltosa e um sistema de drenagem interna de material arenoso.

Esta pesquisa contribui para a otimização do monitoramento piezométrico em barragens de mineração, com foco na prevenção de falhas estruturais e na garantia da segurança das estruturas e do meio ambiente.

2 METODOLOGIA

A permeabilidade do solo é uma propriedade fundamental para diversos projetos de engenharia, como fundações, obras de terraplenagem e projetos de drenagem. A determinação da permeabilidade in situ pode ser realizada através de diferentes métodos, com os ensaios de rebaixamento e infiltração sendo alguns dos mais utilizados (Craig, 2004).

O manual da ABGE (2013) apresenta cinco diferentes metodologias para execução do ensaio de permeabilidade in situ. A escolha do tipo de ensaio depende da disponibilidade de recursos, das características do local e do objetivo do estudo. Os ensaios de carga (infiltração e rebaixamento) são mais simples e geralmente preferidos, pois não exigem a instalação de bombas.

No ensaio de rebaixamento, inicialmente, o tubo do piezômetro é preenchido com água. Em seguida, interrompe-se o fornecimento de água e registra-se o tempo zero. O nível de água no furo é monitorado em intervalos curtos no início (por exemplo, a cada 15 segundos) e em intervalos mais longos posteriormente (por exemplo, a cada minuto). O ensaio é concluído quando o rebaixamento do nível de água atinge 20% da carga inicial ou após 30 minutos, o que ocorrer primeiro. A partir dos dados de rebaixamento e tempo, a permeabilidade do solo pode ser calculada utilizando diferentes métodos, como a Lei de Darcy. Entretanto, a aplicabilidade deste ensaio é limitada pela permeabilidade do solo, não sendo possível aplicá-lo em todos os cenários.

O ensaio de infiltração inicia-se com o preenchimento do piezômetro Casagrande com água, momento em que se registra o tempo zero. Durante todo o ensaio, mantém-se constante o nível de água no furo, o que requer a adição periódica de água, cujo volume total adicionado (vazão) é medido em intervalos regulares de tempo. A vazão de água infiltrada no solo é registrada em intervalos regulares, tipicamente de 1 a 5 minutos. Os dados de tempo e volume acumulado de água infiltrada são empregados na construção de um gráfico.

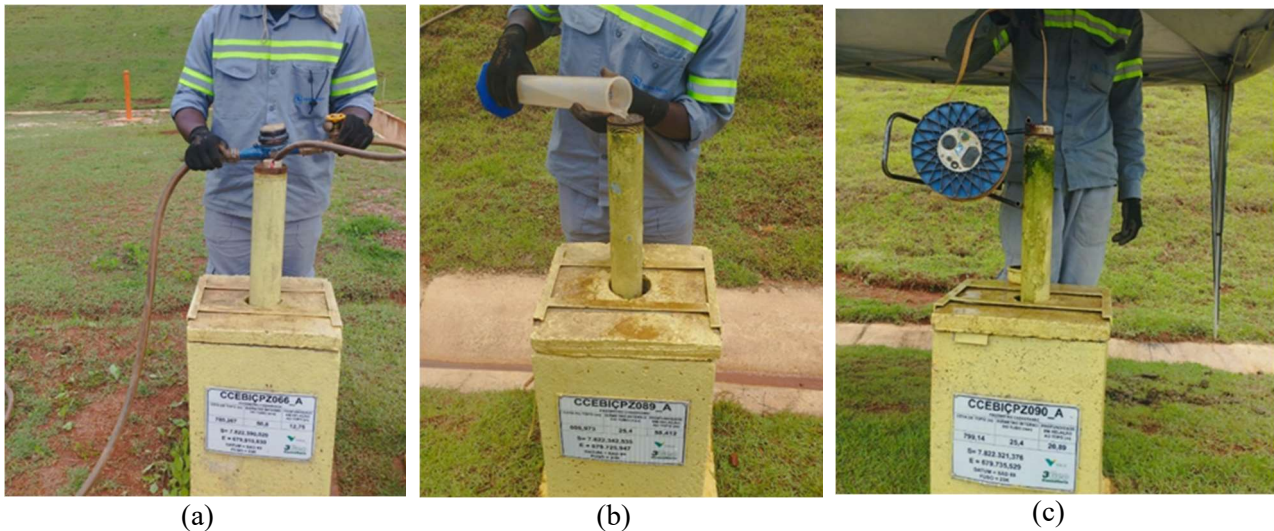
Os testes de permeabilidade in situ foram conduzidos em um período de dois anos. Durante este tempo, em determinados instrumentos, houve uma alternância entre os métodos de rebaixamento e infiltração. De maneira amostral, seis destes instrumentos foram selecionados para comparação entre os resultados obtidos pelo ensaio de rebaixamento e infiltração.

Os seis instrumentos do estudo apresentavam nível de água na data da execução do ensaio, com as células de medição dos instrumentos saturadas em sua totalidade. Durante a execução de ambos os tipos de ensaio, a coluna de água dos instrumentos foi elevada até a cota de topo dele. Os ensaios de rebaixamento foram acompanhados com a utilização de um medidor de nível de água elétrico (PIU) e um cronômetro. Já no ensaio de infiltração, a vazão foi medida com a utilização de proveta e cronômetro para instrumentos com

baixa permeabilidade, e hidrômetro e cronômetro para instrumentos com permeabilidade alta. Os ensaios de infiltração tiveram duração que variaram entre 20 e 25 minutos, com as leituras de vazão sendo coletadas a cada minuto.

Na Figura 1, temos representado a execução dos ensaios de infiltração com a utilização de hidrômetro (a) e de proveta (b), e de rebaixamento (c) com o auxílio do medidor elétrico de nível de água (PIU).

Figura 1 – Execução dos Ensaios em Campo



3 REFERENCIAL TEÓRICO

O tempo de resposta de um piezômetro, é o tempo necessário para que ocorra a equalização da pressão hidrostática em um sistema de medição de pressão. Esse tempo de resposta depende do tipo e das dimensões da instalação do ponto de medição de pressão, bem como da permeabilidade do solo. Quanto maior a permeabilidade do solo, menor será o tempo de resposta.

Para o ensaio de rebaixamento, a determinação do coeficiente de permeabilidade (k) e do tempo de equalização em piezômetros Casagrande pode ser realizada com base nas equações (1), (2) e (3), propostas por Hvorslev (1951), válidas para ensaio abaixo do nível de água.

$$k = \frac{A}{F \cdot T} \quad (1) \quad F = \frac{2\pi L}{\ln \left[\frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{D} \right)^2} \right]} \quad (2) \quad E = \frac{H}{H_0} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad (3)$$

Onde:

A é a área da seção transversal (cm^2) efetiva do tubo do piezômetro, que considera o diâmetro interno (d)
 T é o basic time lag (s).

L é o comprimento da célula piezométrica (cm);

D é o diâmetro da célula piezométrica (diâmetro do bulbo do piezômetro) (cm).

d é o diâmetro interno ao tubo do piezômetro Casagrande em cm

H é a coluna de água em qualquer instante de tempo t

H_0 é a coluna de água ativa em $t=0$ s

E é a equalização em %

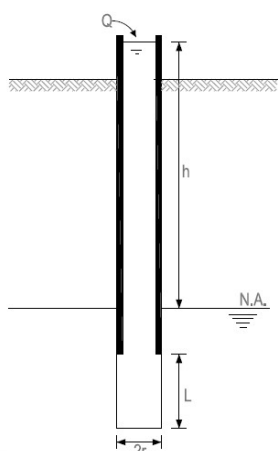
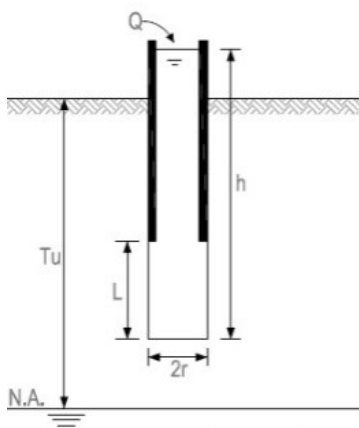
F é o fator de forma que depende da geometria do piezômetro.

A Teoria de Hvorslev (1951) assume que o solo é isotrópico, incompressível, e segue a Lei de Darcy. Os tubos de leitura são considerados incompressíveis e não há variação do nível piezométrico do solo durante a aplicação dos excessos de carga (ΔH) nos ensaios.

A análise da curva de tempo versus volume permite determinar a vazão constante, que é utilizada no cálculo da permeabilidade do solo conforme as formulações de Zangar (1953).

Na Figura 2, é apresentada a formulação para cálculo de permeabilidade para o ensaio de infiltração em dois contextos. No piezômetro da esquerda, o instrumento apresenta nível de água em seu interior no início da execução do ensaio, logo, o solo no entorno da célula de medição já se encontra saturado. Já no piezômetro da direita, o instrumento se encontrava seco no momento de início da execução do ensaio, logo, o solo entorno da célula de medição não se encontrava saturado.

Figura 2 – Formulações para a determinação do coeficiente de permeabilidade através de ensaios de infiltração

Solo Saturado	Solo Não-Saturado
$k_s = \frac{Q}{h \cdot C_s \cdot r} \quad (4)$	$k_u = \frac{Q}{h \cdot C_u \cdot r} \quad (6)$
$C_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{r \cdot \ln\left(\frac{L}{r}\right)} \quad (5)$	$C_u = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (2h - L)}{r \cdot h \cdot \left[\sinh^{-1}\left(\frac{L}{r}\right) - \frac{L}{h}\right]} \quad (7)$
	

Os parâmetros apresentados nas expressões acima são definidos como:

- k_s é o coeficiente de permeabilidade para solos saturados (m/s);
- k_u é o coeficiente de permeabilidade para solos não saturados (m/s);
- C_s é o coeficiente de condutividade em meios saturados.
- C_u é o coeficiente de condutividade em meios não-saturados.
- Q é a vazão mantida constante durante o ensaio de infiltração (m^3/s);
- h é a coluna de água mantida constante durante o ensaio de infiltração (m);
- r é o raio ($d/2$) do furo do solo (m);
- L é o comprimento do trecho ensaiado (m).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de permeabilidade in situ, obtidos por meio de ensaios de rebaixamento e infiltração, são fundamentais para entender o comportamento hidráulico do solo. Conforme apresentado na Tabela 1, os coeficientes de permeabilidade (k) foram calculados para diferentes zonas e profundidades (L) para os anos de 2020 e 2022.

Ao analisar os coeficientes de permeabilidade (k) apresentados na Tabela 1, obtidos em 2020 através de testes de rebaixamento e em 2022 por meio de testes de infiltração, observa-se que os valores apresentam uma ordem de grandeza similar. Por exemplo, para o piezômetro PZ089 na zona de fundação, o k passou de $5,0 \times 10^{-5}$ cm/s (rebaixamento) para $3,0 \times 10^{-5}$ cm/s (infiltração), enquanto para o piezômetro PZ066 na zona de drenagem, o valor de k permaneceu constante em $3,0 \times 10^{-3}$ cm/s para ambos os testes. Essas observações indicam que, apesar das pequenas variações numéricas, a permeabilidade dos solos medida pelas duas metodologias é comparável e consistente. Essa consistência sugere que a escolha entre testes de rebaixamento ou infiltração pode ser feita com base em conveniências operacionais e logísticas, sem comprometer significativamente a precisão dos resultados obtidos. Portanto, a permeabilidade do solo nas diversas zonas investigadas permanece praticamente inalterada independentemente da metodologia aplicada, reforçando a confiabilidade dos dados para fins de análise e planejamento de engenharia.

Tabela 1 – Cálculo dos coeficientes de permeabilidade (k)

Ano		2020			2022	
Piezômetro	Zona	L (m)	Testes in situ	k (cm/s)	Testes in situ	k (cm/s)
PZ065	Fundação	1,0	Rebaixamento	$1,0 \times 10^{-3}$	Infiltração	$6,0 \times 10^{-4}$
PZ066	Drenagem	1,0	Rebaixamento	$3,0 \times 10^{-3}$	Infiltração	$3,0 \times 10^{-3}$
PZ089	Fundação	2,0	Rebaixamento	$5,0 \times 10^{-5}$	Infiltração	$3,0 \times 10^{-5}$
PZ090	Fundação	3,0	Rebaixamento	$3,0 \times 10^{-4}$	Infiltração	$6,0 \times 10^{-4}$
PZ091	Fundação	3,0	Rebaixamento	$8,0 \times 10^{-4}$	Infiltração	$4,0 \times 10^{-4}$
PZ092	Aterro	1,0	Rebaixamento	$9,0 \times 10^{-3}$	Infiltração	$1,0 \times 10^{-3}$

Além disso, para os ensaios de rebaixamento, o tempo de resposta correspondente à equalização de 90% foi determinado por meio da equação (3). A Tabela 2 apresenta os tempos de resposta (t) calculados para uma equalização de 90%. Os tempos de resposta dos piezômetros analisados variaram de alguns minutos a aproximadamente uma hora. Essas informações são fundamentais para o dimensionamento das taxas de coleta de dados e a otimização da coleta de dados automatizada.

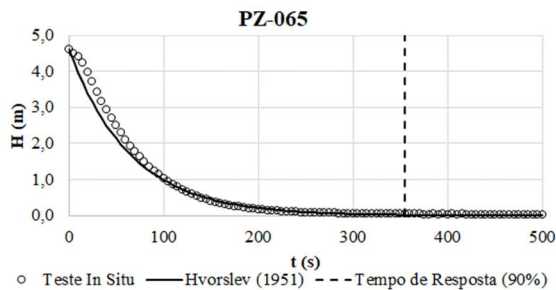
Tabela 2 – Tempo de resposta (t) calculado para uma equalização de 90%

Piezômetro	L (m)	d(cm)	D (cm)	k (cm/s)	Hvorslev (1951)		Penman (1960)		
					F (cm)	T (s)	t (s)	t (min)	t (hora)
PZ065	1,0	5,08	11,43	$6,0 \times 10^{-4}$	219,3	154,0	354,7	5,91	0,10
PZ066	1,0	5,08	11,43	$3,0 \times 10^{-3}$	219,3	30,8	70,9	1,18	0,02
PZ089	2,0	5,08	11,43	$3,0 \times 10^{-5}$	353,4	1911,8	4402,2	73,37	1,22
PZ090	3,0	5,08	11,43	$6,0 \times 10^{-4}$	475,9	71,0	163,5	2,72	0,05
PZ091	3,0	5,08	11,43	$4,0 \times 10^{-4}$	475,9	106,5	245,2	4,09	0,07
PZ092	1,0	5,08	11,43	$1,0 \times 10^{-3}$	219,3	92,4	212,8	3,55	0,06

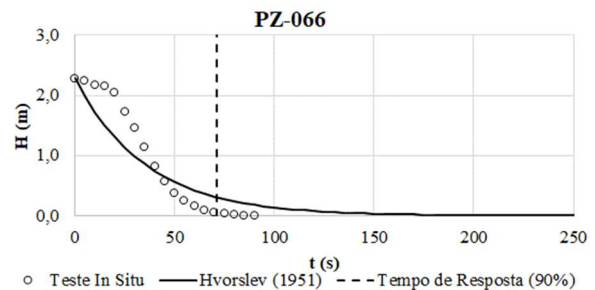
Os gráficos subsequentes da Figura 3 comparam as curvas reais dos ensaios de infiltração com os resultados teóricos do trabalho de Hvorslev (1951), o que demonstra que os tempos de resposta calculados

estão em conformidade com os ensaios de rebaixamento realizados. Isso reforça a confiabilidade dos cálculos de tempo de resposta e sua aplicabilidade na prática.

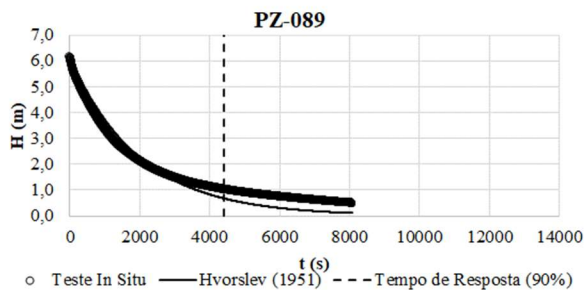
Figura 3 – Ensaio de rebaixamento e tempos de resposta



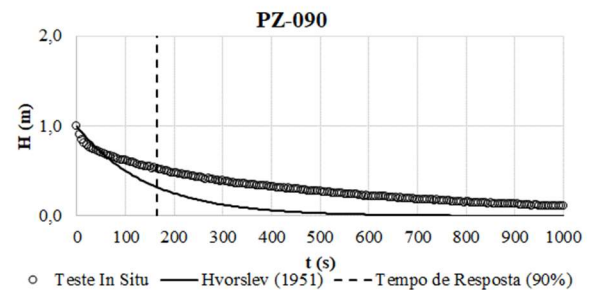
(a)



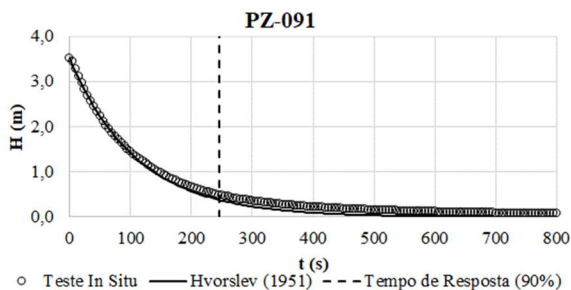
(b)



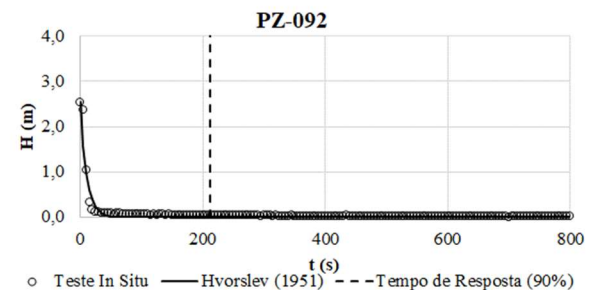
(c)



(d)



(e)



(f)

No entanto, é importante ressaltar que os tempos de resposta calculados por essa teoria podem ser influenciados por vários fatores, como sedimentação ou obstrução do ponto de captação, filtro ou solo circundante, entre outros. Portanto, é necessário realizar esses testes com determinada frequência (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2020).

5 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma avaliação detalhada dos tempos de resposta de piezômetros Casagrande em uma barragem de rejeitos em Itabira, Minas Gerais. Através da realização de ensaios de permeabilidade in situ, foi possível obter dados significativos sobre as condições hidráulicas do local.

Os resultados demonstraram que os coeficientes de permeabilidade obtidos por meio de ensaios de rebaixamento e infiltração foram próximos, indicando a confiabilidade dos métodos utilizados. Além disso, os tempos de resposta dos piezômetros analisados variaram de alguns minutos a aproximadamente uma hora, fornecendo informações valiosas para o dimensionamento das taxas de coleta de dados e a otimização da coleta de dados automatizada.

Este estudo ressalta a importância do monitoramento geotécnico efetivo para a segurança de barragens de mineração. A avaliação dos tempos de resposta dos piezômetros permite a identificação antecipada de problemas, possibilitando ações corretivas imediatas. Além disso, fornece percepções valiosas para a otimização da coleta de dados automatizada, garantindo a eficiência do monitoramento geotécnico. Com dados precisos e tempestivos, é possível implementar medidas preventivas e corretivas que assegurem a integridade da barragem e a segurança das áreas circunvizinhas. A aplicação dessas metodologias e a interpretação cuidadosa dos dados são essenciais para a gestão de riscos em barragens de rejeitos, contribuindo para a sustentabilidade e segurança das operações de mineração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vale S.A. pela disponibilização de dados geotécnicos da barragem situada na cidade de Itabira, estado de Minas Gerais, Brasil. Esta contribuição foi essencial para a execução deste estudo. O compromisso com a transparência e o compartilhamento de dados desempenha um papel vital no progresso do conhecimento acerca do comportamento de barragens de terra e na implementação de medidas de segurança mais efetivas na indústria de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 2013. Ensaios de Permeabilidade em solos: orientações para a sua execução no campo. 4.ed. São Paulo
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). RESOLUÇÃO ANM Nº 95, DE 07 DE FEVEREIRO DE 2022. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 fev. 2022. Seção 1, p. 69-79.
- CRAIG, R. F. (2004). Soil Mechanics (7° ed.). Londres: Spon Press.
- HVORSLEV, M. J. (1951). Time lag and soil permeability in ground-water observations. Bulletin No. 36, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers.
- 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.p.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2020). Department of the Army, Instrumentation of Embankment Dams and Levees. Manual No. 1110-2-1908. Washington, DC: CECW-EG, 441 G Street, NW, 20314-1000.
- ZANGAR, C. N. Theory and problems of water percolation. United States Department of the Interior – Bureau of Reclamation. Denver, Colorado. 1953.87.