

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/11

Análise de estabilidade de taludes para fechamento de barragens - Estudo de caso

Eduardo Thomazine Peruzzo

Engenheiro de Projetos Sênior, Faculdade Arnaldo, Paragominas, Brasil, Edu_thomazine@hotmail.com

Marcio Fernandes Leão

Geólogo-Geotécnico, Tractebel/UFV, Belo Horizonte, Brasil, marciotriton@hotmail.com

RESUMO: O fechamento de uma barragem corresponde à conclusão do uso dessa estrutura para receber rejeitos do processo de mineração, além da remoção de estruturas temporárias e monitoramento das permanentes, seguido de ações de recuperação da área para viabilizar o uso futuro. O tema ainda é novo no Brasil e no mundo. Em 2021, no Brasil, o Plano de Fechamento de Minas passou a ser regulamentado e detalhado, quando foi promulgada a Resolução nº 68 da Agência Nacional de Mineração, que trata do Fechamento de Minas e demais estruturas. Em 2022, foi editada a Resolução nº 95, que define medidas regulatórias aplicáveis às barragens de mineração. Em 2023, a Resolução nº 130 altera a Resolução nº 95 e estabelece novos parâmetros para segurança e descaracterização de Barragens. O objetivo geral do artigo é apresentar os estudos geotécnicos do fechamento de duas estruturas que estão contempladas dentro do mesmo sistema de disposição de rejeitos. Nesse sistema existem duas barragens, aqui denominadas de barragens A e B. A partir dos estudos previamente realizados, foram avaliadas geotecnicamente duas barragens A e B sob o ponto de vista de Fechamento. Os resultados mostraram boa aderência geotécnica ao plano de fechamento da estrutura. Dada a recente obrigatoriedade dos planos de fechamento no país, para abrir novas fronteiras visando à eficácia da tomada de decisão, convém a análise da legislação brasileira atual comparativamente a de outros países cuja implementação de planos está consolidada.

PALAVRAS-CHAVE: Fechamento de barragens, Barragens de Mineração, Legislação.

ABSTRACT: The closure of a dam corresponds to the completion of the use of this structure to receive tailings from the mining process, in addition to the removal of temporary structures and monitoring of permanent ones, followed by actions to recover the area to enable future use. The topic is still new in Brazil and around the world. In 2021, in Brazil, the Mine Closure Plan became regulated and detailed, when Resolution No. 68 of the National Mining Agency was promulgated, which deals with the Closure of Mines and other structures. In 2022, Resolution No. 95 was published, which defines regulatory measures applicable to mining dams. In 2023, Resolution No. 130 amends Resolution No. 95 and establishes new parameters for the safety and decharacterization of Dams. The general objective of the article is to present the geotechnical studies of the closure of two structures that are included within the same waste disposal system. In this system there are two dams, here called dams A and B. Based on previously carried out studies, two dams A and B were geotechnically evaluated from the Closure point of view. The results showed good geotechnical adherence to the structure's closure plan. Given the recent mandatory closure plans in the country, to open new borders aiming at effective decision-making, it is advisable to analyze current Brazilian legislation in comparison with that of other countries whose implementation of plans is consolidated.

KEYWORDS: Dam closure, Mining Dams, Legislation.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento da desativação e fechamento de uma mina, seja para um novo projeto ainda em elaboração, seja de uma mina já em funcionamento, é tema cada vez mais presente na pauta de discussão das empresas de mineração, dos órgãos reguladores e do meio acadêmico (SÁNCHEZ, 2013).

A terminologia desativação de mina é empregada por diversos autores como fechamento de mina. Para esse processo, caracterizam ações que compõe o descomissionamento, a reabilitação, a manutenção e monitoramento e o pós-fechamento (VICK, 1983).

A não reabilitação de áreas degradadas pela mineração ou a aplicação de técnicas inadequadas na execução dos planos de desativação e fechamento de mina, podem originar passivos ambientais, que por sua vez podem acarretar acidentes ambientais, podendo provocar danos ao meio ambiente e riscos à saúde humana (TONIDANDEL, 2011).

Da década de 80 até os dias atuais leis foram elaboradas especificamente para o setor minerário para orientar os empreendedores quanto às obrigações legais a serem cumpridas antes do fechamento de uma mina (ICMM, 2008). Adotando-se essa premissa, o empreendedor participa de todas as etapas desde a escolha da melhor proposta de desativação, seu detalhamento, discussão junto aos stakeholders, implantação e monitoramento pós-implantação, estando o empreendimento ainda em operação. Uma das etapas previstas no processo de fechamento de uma mina, se deve a desativação de suas estruturas auxiliares, dentre elas, as barragens de rejeitos.

O objetivo geral do artigo é apresentar os estudos geotécnicos do fechamento de duas estruturas (Barragens A e B) que estão contempladas dentro do mesmo sistema de disposição de rejeitos.

2 METODOLOGIA

A metodologia foi baseada na utilização de estudos realizados para duas barragens, aqui referenciadas como barragem A e barragem B, devido ao sigilo quanto ao nome real dessas estruturas. Posteriormente, foram elencadas as premissas para que as análises geotécnicas fossem desenvolvidas, tais como: o restabelecimento das condições originais da fauna e flora do local degradado, sem necessidade de reconformação do terreno; a manutenção da estrutura em si, buscando a proteção de nascentes à montante e desvio do fluxo para jusante; e intervenções geotécnicas necessárias para reconformação superficial dos reservatórios.

Foi determinada a capacidade de suporte do rejeito buscando obter a resistência não drenada e a escolha do equipamento para atuar no projeto sem trazer prejuízos à estabilidade de ambas as barragens.

Para as análises de estabilidade de ambas as barragens, foi considerada a seção de maior altura (seção crítica). As análises de estabilidade contemplaram a condição normal de operação, pós-fechamento e pseudo-estática, para ambas as barragens. Para essa última recomendação, seguiu o que preconiza a ELETROBRÁS (2003). Assim, as análises adotaram os valores de aceleração de 0,05 g na horizontal e 0,03 g na vertical. O Fator de Segurança (FS) foi determinado pelo método de GLE/Morgenstern-Price para superfícies de ruptura não circulares otimizadas e o cálculo do FS conduzido pelo programa Slide Rocscience Inc. versão 6.025.

Os parâmetros dos materiais para as análises (Tabela 1) foram baseado em resultados de ensaios de laboratório, em ambas as barragens,

Tabela 1. Parâmetros dos materiais utilizados nas análises de estabilidade.

Barragem	Material	Cor	γ (kN/m ³)	c'(kPa)	ϕ' (°)	Su/ σ_v
A	Rocha Alterada		21	40	34	-
	Solo Residual de Arenito		20	0	33	-
	Solo Aluvionar ¹		18	20	0	-
	Aterro Berma de Equilíbrio		19	-	-	0,5
	Aterro Compactado		20	16	32	-
	Aterro Esteirado		19	-	-	0,5
	Aterro Submerso ¹		16	16	0	-
	Rejeito Montante		15	-	-	0,144
	Rejeito Jusante ³		16	20	0	-
	Filtro		18	0	32	-
B	Aterro Compactado		20	4	36	-
	Fundação		18	12	33	-
	Rejeito		15	-	-	0,144
	Filtro		18	0	30	-

Legenda: ¹ – Resistência não drenada ($\phi'=0$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Capacidade de Suporte dos Rejeitos

Para a verificação da capacidade suporte dos rejeitos e a partir da análise de enchimento obteve-se a curva de distribuição de índice de vazios com a profundidade, sem considerar o ressecamento (Figura 1). Em seguida, a parte superior desta curva foi modificada a partir de uma estimativa do índice de vazios na superfície após o ressecamento (igual a 1) (Figura 2). Este valor foi obtido em amostras coletadas em campo.

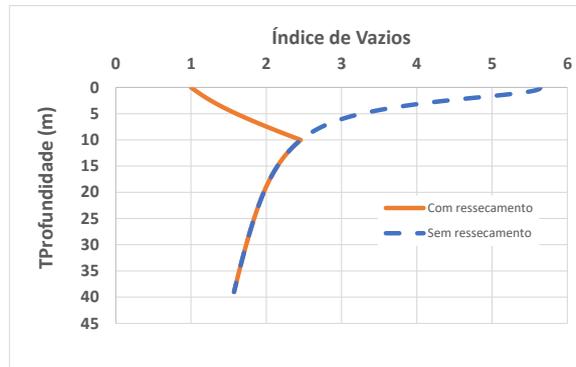


Figura 1. Variação do índice de vazios do rejeito com a profundidade sem e com ressecamento.

A partir da curva de compressibilidade do rejeito e a distribuição de índice de vazios com a profundidade com ressecamento determinou-se a distribuição de tensão efetiva vertical com a profundidade com e sem o ressecamento (Figura 2).



Figura 2. Variação com a profundidade das tensões efetivas no rejeito.

Em seguida, através das equações 1 e 2 (ATKINSON, 1981) foi determinada a tensão efetiva média no estado crítico (p') e a resistência não drenada do rejeito (S_u):

$$p' = \sigma'_v \left(\frac{1+2K_0}{3} \right) \quad (1)$$

$$s_u = \frac{1}{2} M p' \exp \left(- \frac{\lambda-e}{\lambda} \log 2 \right) OCR \frac{\lambda-e}{\lambda} \quad (2)$$

Onde, K_0 e M , representam o coeficiente de empuxo no repouso e o gradiente da linha de estado crítico do Modelo Cam-Clay, respectivamente. Esses parâmetros foram calculados, por meio do ângulo de atrito de atrito efetivo do rejeito (ϕ'), usando as equações 3 e 4 (JEFFERIES & BEEN, 2015):

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (3)$$

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 + \sin \phi'} \quad (4)$$

O ângulo de atrito do rejeito foi estimado a partir de resultados de ensaios no rejeito e experiência dos autores. Adotou-se ϕ igual a 22° . (recomenda-se que sejam realizados ensaios de laboratório com amostras do rejeito para obter este parâmetro). Com este valor adotado encontrou-se $K_0 = 0,625$ e $M = 0,666$. Os parâmetros de inclinação da reta virgem (λ) e índice de vazios (e) foram obtidos das curvas de compressibilidade do rejeito (Figura 3), segundo o Modelo Cam-Clay, correspondendo a 0,163 e 0,041, respectivamente.

Por fim, foi realizada também a distribuição com a profundidade da resistência não-drenada (S_u) do rejeito (Figura 4), a partir de dados disponibilizados em estudos realizados para o rejeito.

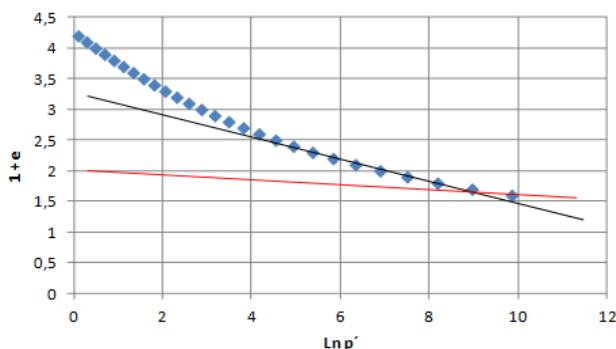


Figura 3. Determinação de λ pela linha de estado crítico (preta) e de e pela linha consolidação isotrópica (vermelha).



Figura 4. Variação com a profundidade da resistência não-drenada no rejeito com ressecamento.

Obtida a distribuição de resistência não-drenada com a profundidade, estimou-se um valor médio de S_u nos primeiros 2 m de profundidade, correspondendo a 81 kPa. Adotou-se 2 m, pois o bulbo de tensões formado por carregamentos aplicados na superfície aprofunda-se até cerca de 2 vezes a largura da faixa na qual o carregamento é aplicado. A partir desta profundidade, o acréscimo de tensão devido à sobrecarga é muito pequeno. Como a esteira dos tratores ou os pneus dos caminhões tem, no máximo, 0,5 m, deduz-se que o carregamento vai ser absorvido pelo primeiro metro de rejeito. Mesmo assim, por segurança, adotou-se 2 m.

Com este valor médio de S_u , calculou-se a capacidade de carga do rejeito (q_f) de acordo com a Equação 5 (Atkinson (1981), Parry (1995), Skempton (1951)):

$$q_f = (2 + \pi) s_u = 415,74 \text{ (kPa)} \quad (5)$$

Por fim, obteve-se a carga dos equipamentos (q_{atuante}), conforme Equações 6 e 7. No caso de trator de esteira D8T a pressão exercida no solo é de 106 kPa, e, no caso de caminhões com pneus 275/80R22.5 a pressão exercida no solo é de 897 kPa. Ou seja, para o trator de esteira mencionado o coeficiente de segurança (C_f) foi de 3,9 (bastante aceitável) e para o caminhão de 0,46 (inaceitável), respectivamente.

$$C_f = \frac{q_f}{q_{\text{atuante}}} = 3,9 \quad (6)$$

$$C_f = \frac{q_f}{q_{atuante}} = 0,46 \quad (7)$$

A partir dos resultados nota-se que os rejeitos adensam lentamente dentro dos reservatórios, o que influencia o momento do seu fechamento, quando máquinas terão que trabalhar sobre os mesmos para conformá-los de acordo com o projeto. Portanto, levantamentos topográficos devem ser realizados a fim de acompanhar o adensamento e compactação do rejeito, corrigindo, caso necessário, as declividades, a fim de evitar acúmulo de água no interior do reservatório.

3.2 Análise de Estabilidade

Na condição normal de operação (Figura 5), o nível d'água a jusante foi assumido como o máximo operacional de projeto (El. 58,00 m). Além disso, foi considerada a implantação de uma berma de equilíbrio, buscando uma melhoria de performance da estrutura a longo prazo. Dada a condição inicial da estrutura, não seria necessária uma intervenção (rebaixamento do nível d'água do reservatório, por exemplo) para a sua construção. Devido ao tempo necessário para implantar as obras de regularização propostas para o fechamento da estrutura, a cota piezométrica no rejeito e no maciço da barragem foi assumida a partir dos estudos hidrológicos realizados na área, resultando em um FS de 1,51.

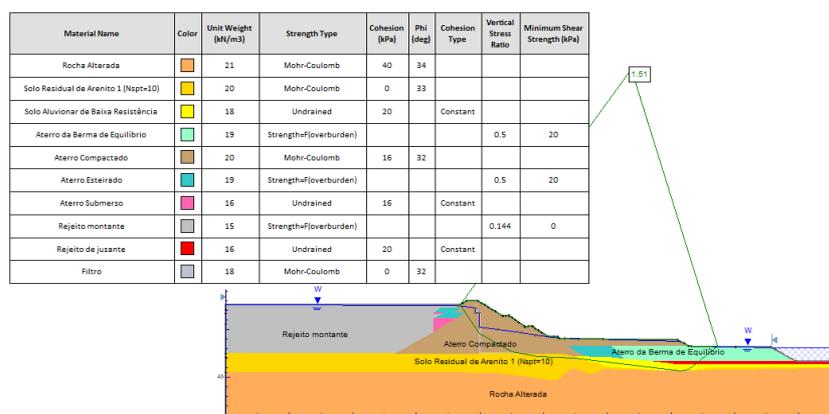


Figura 5. Análise de estabilidade da Barragem A – Condição normal de operação.

Já para a condição pós-fechamento (Figura 6), foi considerado o rebaixamento do nível d'água naturalmente, baseado em estudos hidrológicos, que indicaram não haver contribuição do maciço natural. Tendo em vista o encerramento das operações na barragem, o nível d'água rebaixará progressivamente. Assim, somada a redução do nível d'água com a adoção da berma de equilíbrio, o FS melhora significativamente, ou seja, um FS de 2,05.

Como a barragem não será removida, essa será submetida a condições extremas. Portanto, para a análise pseudo-estática (Figura 7), ou seja, considerando as acelerações sísmicas, mesmo havendo a presença da berma de equilíbrio e manutenção do nível d'água o FS é reduzido para 1,5, porém ainda aceitável (ICMM, 2008).

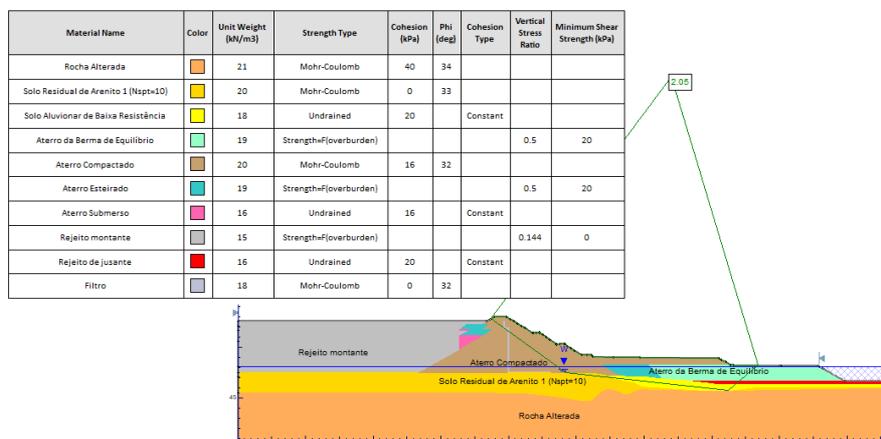


Figura 6. Análise de estabilidade da Barragem A – Pós fechamento.

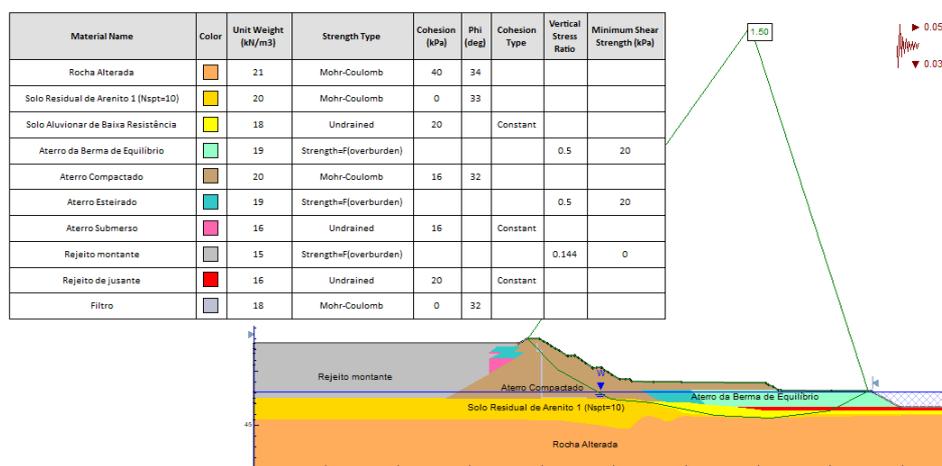


Figura 7. Análise de estabilidade da Barragem A – Pseudo-estática.

Como a Barragem B apresenta condições menos complexas de fundação, comparadas a barragem A, não foi necessário considerar um melhoramento da estabilidade geotécnica da barragem para o fechamento. Assim, foi avaliada a geometria de fechamento, com o maciço da barragem na El. 94,00 m e o reservatório da Barragem B na El. 75,00 m (situação atual do NA) e nível d'água na El. 90,00 m (situação possível caso o reservatório atinja sua capacidade plena de reservação). Devido ao tempo necessário para implantar as obras de regularização propostas para o fechamento da estrutura, a cota piezométrica no rejeito e no maciço da barragem foi assumida como a do nível operacional do reservatório da Barragem B (El. 75,00 m). Caso o reservatório atinja a capacidade plena (El 90 m), avaliou-se a estabilidade da estrutura mediante o estabelecimento das cotas piezométricas no maciço e no rejeito.

Para a condição normal de operação (Figura 8), da mesma forma que observado para a barragem A, os resultados mostram a mesma tendência, ou seja, de melhoria de estabilidade conforme o desenvolvimento do plano de fechamento, indicando um FS de 1,50.

Para as condições pós-fechamento (Figura 9) e extremas pela análise pseudo-estática (Figura 10), foram adotadas as mesmas medidas para a Barragem A, ou seja, o estabelecimento do nível d'água (baseado em estudos hidrológicos) e não continuidade da operação, resultando assim no aumento do FS para 1,66 e, a influência sísmica resultando em um FS de 1,44, respectivamente.

O Quadro 1 resume os fatores de segurança obtidos em todas as análises. Observa-se que os valores dos fatores de segurança, para a condição atual, são superiores a 1,5 e, portanto, apresentam taludes estáveis. Após o fechamento, ao alcançar as cotas piezométricas previstas em projeto, as Barragens A e B apresentam fatores

de segurança admissíveis (ICMM, 2008) demonstrando que geotecnicamente o plano de fechamento é factível.

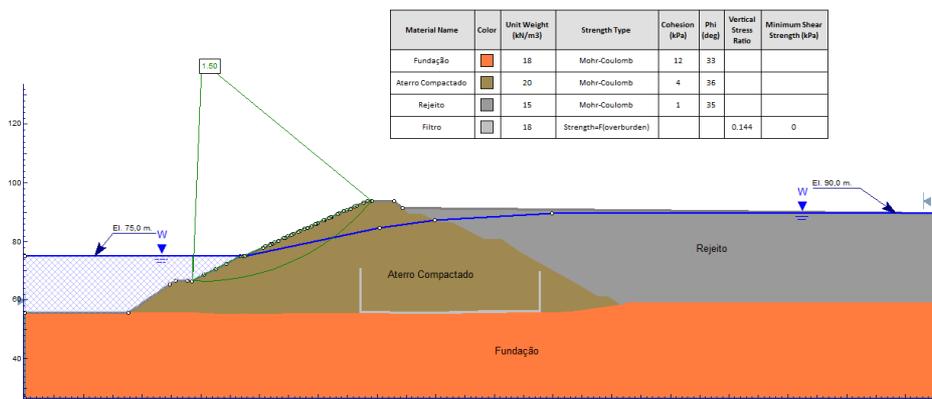


Figura 8. Análise de estabilidade da Barragem B – Condição normal de operação.

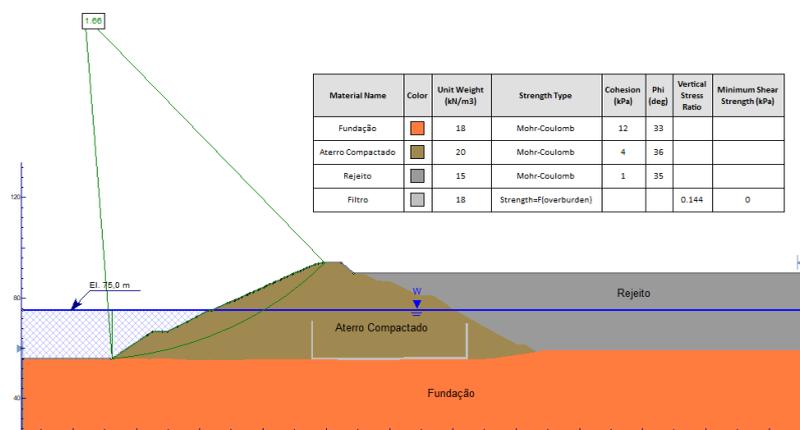


Figura 9. Análise de estabilidade da Barragem B – Pós Fechamento.

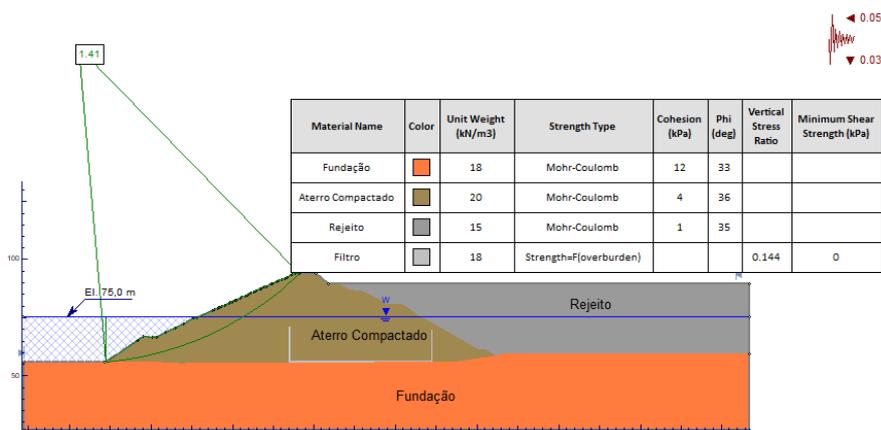


Figura 10. Análise de estabilidade da Barragem B – Pseudo-estática.

Quadro 1. Resultados das análises de estabilidade.

Estrutura	Situação de análise	Fator de segurança
Barragem A	Condição normal de operação	1,51
	Pós fechamento	2,05
	Pseudo-estática	1,50
Barragem B	Condição normal de operação	1,50

Pós fechamento	1,66
Pseudo-estática	1,41

A partir dos resultados é necessário validar: 1) o modelo de enchimento, medindo no campo a curva de enchimento com o tempo e confrontando o resultado por meio de ensaios; e, 2) o índice de vazios da camada superficial ressecada, para determinar o valor unitário usado no cálculo da resistência não-drenada.

Apesar de avaliadas a condição da estabilidade das barragens A e B, já considerando o cenário de fechamento, buscou-se garantir o estabelecimento das cotas piezométricas previstas em projeto por meio de um plano de instrumentação para determinar a cota piezométrica no interior do reservatório. Assim, os piezômetros foram distribuídos ao longo do reservatório de forma a viabilizar o monitoramento até que se alcance as condições finais previstas em projeto, N.A. na El. 58,0 m. para a barragem A e El. 75,0 m. Para a barragem B. É esperado que todo o sistema de rejeitos entre em equilíbrio, alcançando as cotas previstas, em até 8 anos após a paralização das atividades. Para tal, é proposto a instalação de quatro piezômetros do tipo Casagrande. No entanto, recomenda-se que essa instrumentação possa ser automatizada e com a incorporação de piezômetros elétricos.

Ainda durante o monitoramento do sistema de rejeitos, caso identificado qualquer ponto de acúmulo de água no reservatório, devido a recalques diferenciais ou falhas construtivas, deverá ser imediatamente regularizado para evitar a infiltração de água nos rejeitos, o que poderia postergar os prazos previstos para o equilíbrio linha freática no interior do reservatório e o tempo previsto para o adensamento completo do rejeito.

4 CONCLUSÕES

O plano de fechamento de uma barragem é assunto cada vez mais exposto na pauta de discussão de empresas do setor, dos órgãos reguladores e de instituições de ensino. Os parâmetros particulares ao fechamento estão pertinentemente ligados à sustentabilidade e segurança de uma atividade fundamental à sociedade contemporânea. Devido ao aumento do número de minas e avanço de suas normativas, o presente trabalho busca relacionar o resultado do plano de fechamento de barragem para a sociedade e áreas afetadas, dimensionando sua importância no que tange à minimização de impactos socioeconômicos, garantia de uso pós-barragem, redução de riscos de abandono e passivo ambiental, social, bem como moderação de riscos financeiros e de imagem. Além disso, os últimos acidentes envolvendo a mineração reforçaram a necessidade de uma melhor fiscalização nos projetos de fechamento das empresas mineradoras.

REFERÊNCIAS

- Atkinson, J. H. (1981) Foundations and Slopes: An Introduction to Applications of Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill, London.
- ELETOBRÁS (2003). Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas.
- ICMM, INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING & METALS (2008). Planning for Integrated Mine Closure: Toolkit. London. Traduzido e publicado em português pelo IBRAM.
- Jefferies, M. & Been, K. (2015). Soil liquefaction: a critical state approach, 2nd ed. CRC Press.
- Parry, R.H.G. (1995) Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics. E. & F.N. Spon, London.
- Sánchez, L.E., Silva-Sánchez, S.S., Neri, A.C. (2013) Guia para o Planejamento do Fechamento de Mina. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração.
- Skempton, A. W. (1951) The bearing capacity of clays. Proceedings Building Research Congress, 1, 180-9.
- Tonidandel, R. P. (2011) Aspectos legais e ambientais do fechamento de mina no Estado de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica Aplicada) - Universidade Federal de Minas Gerais – MG, 146p.
- Vick, S.G., (1983) Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams, Wiley Interscience. New York.