

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/500

Avaliação de Fatores de Segurança Determinísticos e Probabilidades de Ruptura na Definição de Níveis de Controle Piezométricos

Guilherme Henrique da Silva Pinto

Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima – MG, Brasil

guilherme.henrique@pimentadeavila.com.br

Juliana Santos Fabre

Engenheira Geotécnica, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima – MG, Brasil

juliana.fabre@pimentadeavila.com.br

RESUMO: Níveis de controle de instrumentação são ferramentas utilizadas na gestão de risco e tomada de decisão referente à segurança de estruturas. Usualmente, os níveis de controle piezométricos são determinados por meio de análises de estabilidade por equilíbrio limite, utilizando abordagem determinística. Contudo, é reconhecido que a variabilidade inerente dos parâmetros de resistência, representa um dos maiores fatores de incerteza nas análises de estabilidade. Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo realizar análises de estabilidade determinísticas para definir os níveis de controle piezométricos de uma barragem de contenção de rejeitos e, posteriormente, realizar análises probabilísticas para calcular a probabilidade de ruptura nestes cenários e discutir sobre ambos resultados. Foi considerada uma barragem de contenção de rejeitos fictícia e dados de uma campanha real de ensaios de laboratório em aterro compactado (ensaios de caracterização e ensaios triaxiais do tipo CID e CIU), para o qual foram coletados 30 blocos. A partir das linhas freáticas definidas, foram realizadas análises probabilísticas para verificação das probabilidades de ruptura correspondentes a cada cenários. Os resultados indicaram que as probabilidades de falhas obtidas são consideradas inaceitáveis a partir do intervalo considerado, demonstrando a necessidade de aprimoramento da metodologia determinística comumente empregada na gestão de estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Níveis de controle, Análises Determinísticas, Análises Probabilísticas.

ABSTRACT: Instrumentation trigger levels are tools used in risk management and decision-making regarding the safety of the structure. Usually, piezometric trigger levels are determined through limit equilibrium stability analyses, using a deterministic approach. However, it is recognized that the inherent variability of shear strength parameters represents one of the greatest factors of uncertainty in geotechnical analyses. Therefore, the herein paper aims to carry out deterministic stability analyses to define the piezometric trigger levels of a tailings storage facility and, subsequently, carry out probabilistic analyses to calculate the probability of failure in these scenarios. A fictitious tailings storage facility and data from a laboratory test campaign for the compacted landfill were considered, in which 30 blocks were collected (including characterization tests and triaxial tests of the CID and CIU types). Based on the defined phreatic lines, probabilistic analyses were carried out to verify the rupture probabilities corresponding to these three scenarios. The results indicated that the failure probabilities obtained are considered unacceptable based on the range considered, demonstrating the need to improve the commonly used deterministic methodology.

KEYWORDS: Instrumentation Trigger Levels, Deterministic Analysis, Probabilistic Analysis.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de segurança de estruturas geotécnicas, em especial as barragens de mineração, é constante pauta do meio técnico desde as rupturas da Barragem de Fundão em 2015 (Mariana/MG), e da Barragem de B1 em 2019 (Bromadinho/MG), tendo em vista que a falha de tais estruturas pode provocar danos irreparáveis à comunidade e ao meio ambiente. Uma das formas comumente aplicadas para a avaliação da condição de segurança geotécnica, é a utilização dos chamados “níveis de controle”, que constituem uma das ferramentas mais utilizadas na gestão operacional da estrutura.

Conforme descrito por Marinaro (2022), os níveis de controle são valores de referência obtidos por meio de análises de estabilidade determinísticas, as quais levam em consideração as características gerais do barramento (geometria, carregamentos, materiais constituintes, dentre outros). Tais níveis são determinados para cada um dos modos de falha da estrutura, sendo usualmente o mais reportado na bibliografia, os níveis de controle piezométricos. Neste caso, elaboram-se análises de estabilidade nas quais são modeladas superfícies freáticas hipotéticas associadas a diferentes Fatores de Segurança (F.S.), sendo comumente utilizado o valor de 1,50 para o “nível” auxiliar (ou normal), 1,30 para o “nível atenção”, 1,20 para o “nível de alerta” e 1,10 para o “nível de emergência”. A partir dos níveis obtidos, são mensuradas as poropressões e as elevações de superfície freática obtidas, e avalia-se se a leitura de um determinado instrumento em campo, como um Medidor de Nível de Água (MNA), se encontra acima ou abaixo de cada um dos níveis de controle (PENNA et al., 2017). Dessa forma, têm-se uma rápida ferramenta para a avaliação prévia da condição de segurança da estrutura.

É importante frisar que, no caso da leitura de um instrumento estar acima nível de controle, não quer dizer necessariamente, que toda a estrutura se encontra em um determinado nível e sim, que a condição de segurança da estrutura encontra-se fora dos padrões esperados e necessita de uma avaliação mais detalhada. Nestes casos, por exemplo, pode-se realizar as análises de fluxo e estabilidade com base nas leituras mais atuais dos instrumentos de forma a aferir a real condição de estabilidade da estrutura.

Para a elaboração das análises de estabilidade dos níveis de controle, usualmente são adotados parâmetros de resistência médios obtidos por uma campanha de investigações de campo e/ou laboratório. A partir de tal premissa, os níveis de controle obtidos são atrelados a valores ditos determinísticos, sendo estes assumidos como representativos de todo o horizonte analisado. Entretanto, como demonstrado por Assis (2020), os parâmetros geotécnicos, como o ângulo de atrito efetivo (ϕ') e a coesão efetiva (c'), são parâmetros que naturalmente apresentam variações (incerteza implícita ou natural), que pode apenas ser mensurada e não reduzida (ou tratada) dado que a variabilidade é algo intrínseco ao parâmetro.

A dispersão dos parâmetros pode ser calculada através do Coeficiente de Variação (C.V.), o qual é obtido pela razão entre o desvio padrão (σ) e média (μ) dos valores obtidos, sendo o maior C.V. a maior dispersão observada. Para parâmetros de resistência, como ângulo de atrito efetivo (ϕ') e a coesão efetiva (c'), os trabalhos de Campello *et. al* (2019) e Assis (2020) apresentam valores típicos obtidos para diferentes materiais ensaiados em laboratório. A Figura 1 apresenta o C.V. médio obtido em diferentes trabalhos, compreendendo desde argilas, siltes e areias. Como pode ser observado, o ângulo de atrito apresenta C.V. médios entre 4% e 14%, mostrando baixa dispersão, e a coesão efetiva valores de C.V. médios entre 14% e 43% indicando a alta variabilidade do parâmetro.

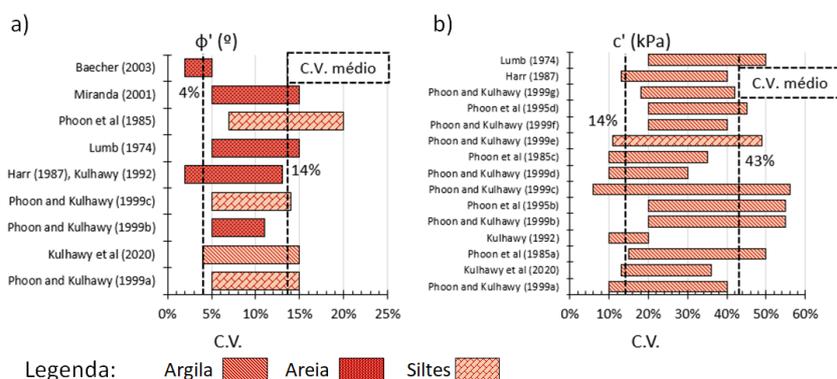


Figura 1. Exemplo de C.V. de parâmetros de materiais sendo: b) coesão; e a) ângulo de atrito. (Adaptado de Campello *et al.* (2019)).

Em contrapartida as análises determinísticas, Assis (2020) detalha que as análises de estabilidade do tipo probabilísticas utilizam o conceito de distribuição de probabilidade das variáveis de entrada para a avaliação dos fatores de segurança das estruturas. Neste tipo de análise, são utilizadas distribuições de probabilidade das variáveis ao invés de um único valor determinístico de um parâmetro (parâmetro de resistência ou peso específico) ou carregamento. Como resultado, é obtido um conjunto de F.S. ao invés de um único valor, sendo calculada a probabilidade de falha (i.e. probabilidade em que a estrutura deixa de comportar com o desempenho esperado). No caso aplicado a estabilidade geotécnica, é considerado como falha da estrutura quando a mesma possui F.S. menor que 1,00, (ruptura).

Diante de todo o exposto, o presente artigo tem por objetivo avaliar o conceito de níveis de controle piezométricos para uma estrutura hipotética, realizando análises probabilísticas após a realização de análises determinísticas. Sendo assim, para cada uma das análises determinísticas de referência para a definição dos níveis de controle (F.S. = 1,50, F.S. = 1,30, F.S. = 1,20 e F.S. = 1,10), foi avaliada a probabilidade de falha a partir da utilização de uma distribuição dos parâmetros de resistência do aterro compactado da estrutura.

2 CARACTERIZAÇÃO E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO ATERRO COMPACTADO

No estudo apresentado neste artigo, optou-se por avaliar apenas a influência da variação dos parâmetros do aterro compactado. Para a caracterização deste material, foram realizados 30 ensaios triaxiais do tipo CIU e CID com tensões confinantes que variaram de 50kPa a 1600kPa em amostras indeformadas do tipo bloco. Todos os ensaios foram realizados na condição saturada com parâmetro B de Skempton (1954) igual ou superior a 95%, seguindo os procedimentos descritos pelas normas americanas D4767-11 (ASTM, 2020) e D7181-20 (ASTM, 2020), para os ensaios CIU e CID, respectivamente. Além disso, foram realizados também ensaios de caracterização (granulometria, plasticidade e massa específica dos grãos) nos mesmos blocos, seguindo as normas D422-63 (ASTM, 2007), D4318-17e1 (ASTM, 2018) e D792-20 (ASTM, 2020). Em complemento foram ensaios de compactação Proctor normal em amostras deformadas e realizado o cálculo do grau de compactação considerando a densidade seca máxima obtida no Proctor e os valores obtidos nos ensaios triaxiais.

A Figura 2 apresenta o resumo dos ensaios de caracterização do aterro compactado. Considerando os valores médios, o material apresenta 44,4% de argila, 44,8% de silte, 6,7% de areia e 4,1% de pedregulho. Na mesma figura também é apresentada a carta de plasticidade do material, com resultados indicando material de baixa plasticidade. Cabe destacar que 10 ensaios apresentaram resultado Não Líquido (NL) e Não Plástico (NP). O valor médio da massa específica dos grãos obtido foi de 2,929 g/cm³.

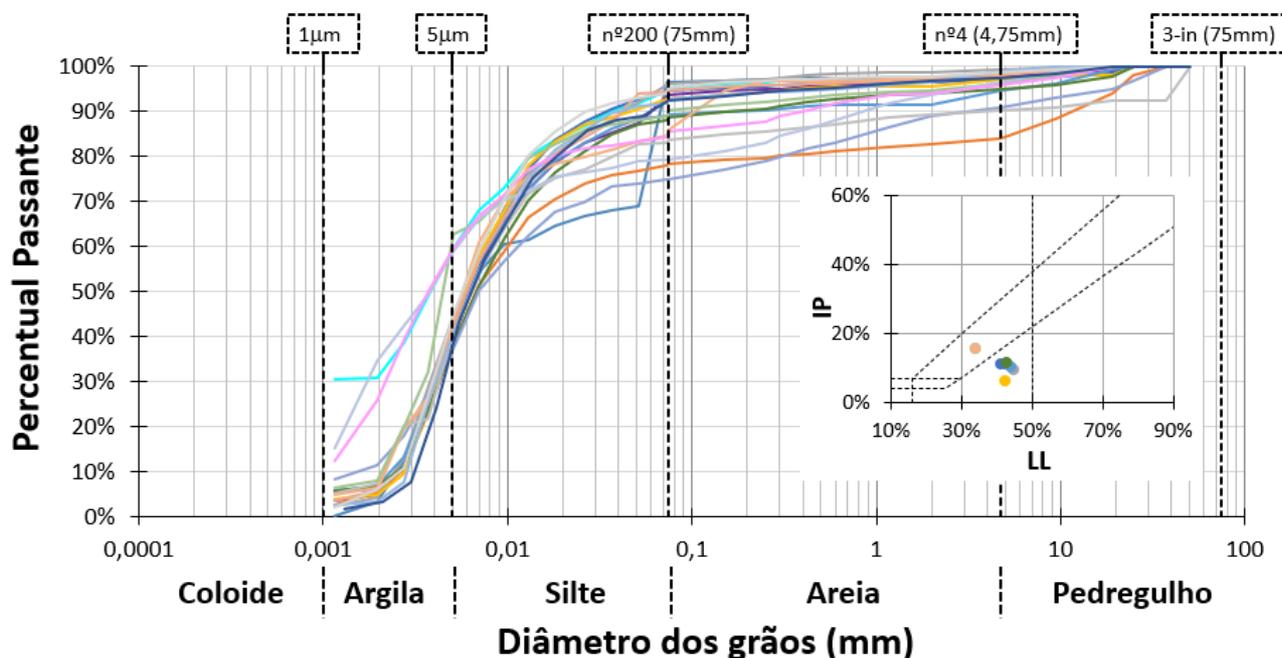


Figura 2. Resumo dos ensaios de caracterização do Aterro Compactado.

Para a determinação dos parâmetros de resistência do aterro, foram realizados 30 ensaios triaxiais distribuídos entre drenados (5) e não drenados (25). A Figura 3 apresenta resultados típicos obtidos para um dos ensaios CIU (Figura 3a) e CID (Figura 3b) realizados em um mesmo bloco. Como pode ser observado, o material apresenta comportamento majoritariamente dilatante para as menores tensões confinantes, com excessos negativos de poropressão nos ensaios CIU e variações volumétricas negativas no ensaio CID. Já para ensaios em maiores tensões, o material apresenta geração de poropressão positiva em baixas deformações, mas, com o desenvolvimento do cisalhamento, logo decai para valores inferiores, mostrando que, também em altas tensões, o material apresenta comportamento dilatante. Dessa forma, conclui-se que o processo de compactação foi eficiente neste material de aterro, visto a resposta comportamental observada.

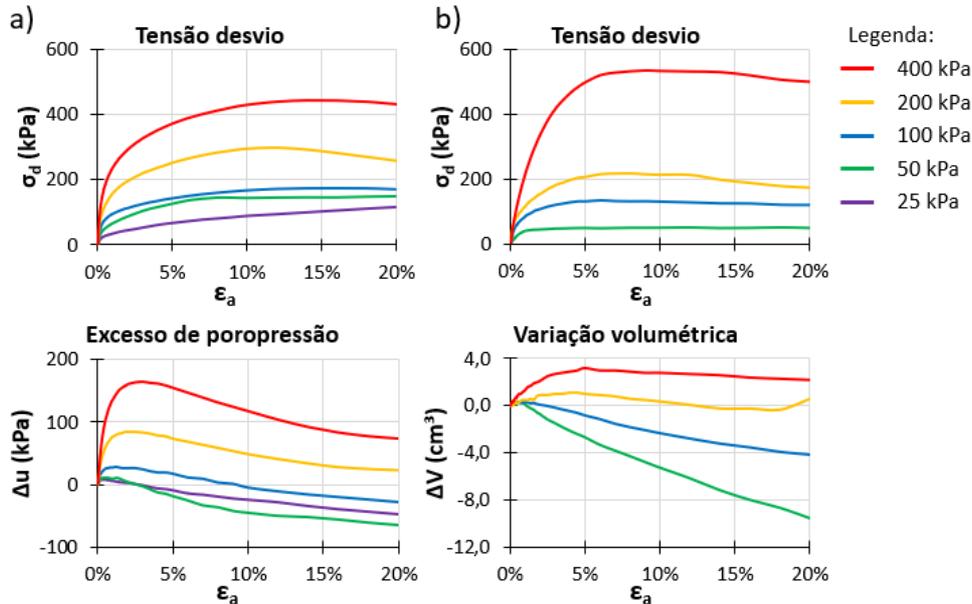


Figura 3. Resultados típicos do Aterro Compactado típicas: a) Ensaio CIU e b) Ensaio CID.

Considerando os resultados obtidos nos ensaios triaxiais, é apresentado na Figura 4 os histogramas, box-plots e as curvas de ajustes, considerando os dados disponíveis. Para o ajuste da curva de distribuição, foram consideradas distribuições normais para a coesão efetiva (c') e para o ângulo de atrito efetivo (ϕ'), seguindo a sugestão de Assis (2020). Como pode ser observado as curvas de distribuição se ajustaram bem aos histogramas obtidos, indicando uma boa aderência do ajuste proposto pelo autor em relação aos dados obtidos.

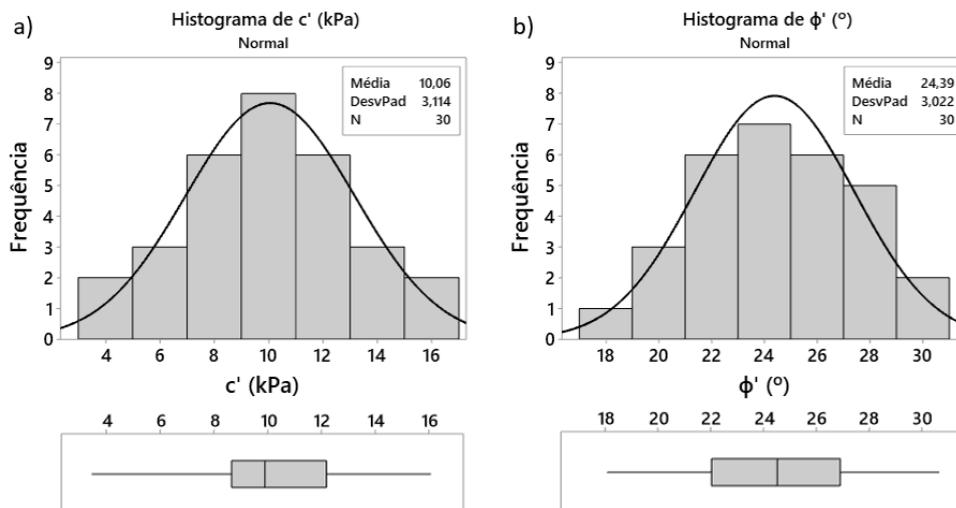


Figura 4. Distribuição Estatística dos Parâmetros Efetivos do Aterro Compactado.

Considerando os dados do histograma, foram obtidos os parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 1, sendo a média (μ), o desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (C.V.), que numericamente é igual a média dividida pelo desvio padrão. Os valores de C.V. obtidos encontram-se dentro do observado por Assis (2020) e Campello *et. al* (2019) apresentados anteriormente na Figura 1 para os parâmetros analisados.

Tabela 1. Resumo dos Parâmetros Estatísticos do Aterro Compactado.

Parâmetro	Média	Desvio Padrão	C.V.
c' (kPa)	10	3,0	30,0%
ϕ' (°)	24	3,0	12,5%

3 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Para a avaliação dos níveis de controle foi adotada uma seção transversal de uma barragem hipotética de contenção de rejeitos com a presença de drenagem interna composta por filtro chaminé e tapete drenante. Para o monitoramento da estrutura, são propostos dois instrumentos do tipo Medidor de Nível de Água (MNA), sendo um localizado na crista e outro na berma de jusante com a cota de instalação de 1,0m acima do dreno, apenas para fins de estudo e avaliação dos níveis de controle. A Figura 5 apresenta a seção tipo com as respectivas dimensões e inclinações.

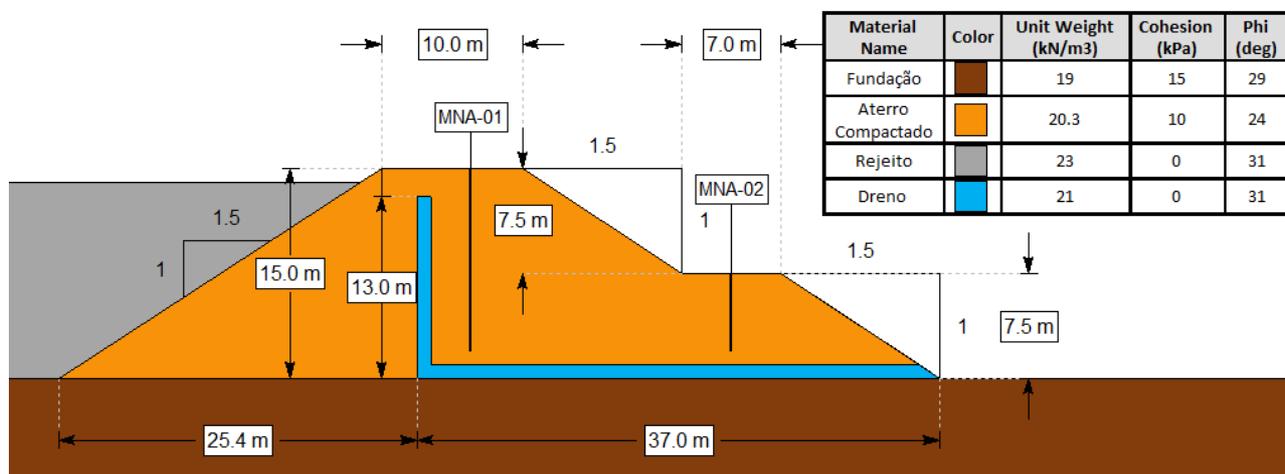


Figura 5. Seção geológico-geotécnica adotada para as simulações numéricas e instrumentos para definição dos níveis de controle.

A Tabela 2 apresenta o resumo dos parâmetros de resistência adotados para as simulações numéricas, sendo que para o aterro compactado estão indicados os valores médios (obtidos conforme a Tabela 1). Para o Solo de Fundação, Dreno e para o Rejeito, foram adotados valores bibliográficos, visto que o objetivo deste artigo é avaliar a ruptura no aterro compactado e as consequências de sua variabilidade.

Tabela 2. Resumo dos Parâmetros de Resistência adotados.

Material	Cor	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	Desvio Padrão
Aterro Compactado	Laranja	20,3	10	24	3,0
Solo de Fundação	Marrom	19,0	15	29	-
Dreno	Azul	21,0	0	35	-
Rejeito	Cinza	23,0	0	31	-

Durante a etapa de obtenção dos níveis de controle determinísticos, foi considerada a colmatagem do sistema de drenagem (situação crítica) a qual provocaria a subida do nível freático e assim a redução do fator de segurança. Sequencialmente, foram estabelecidas freáticas hipotéticas que resultassem em fatores de segurança determinísticos para a condição drenada de acordo com o descrito na Tabela 3.

Tabela 3. Descrição dos cenários simulados e fatores de segurança correspondentes.

FS de referência		Descrição do cenário	Faixa de variação do F.S.
1,50		Correspondendo ao nível auxiliar	$F.S. \geq 1,50$
1,30		Correspondendo ao nível de atenção	$1,49 > F.S. \geq 1,30$
1,20		Correspondendo ao nível de alerta	$1,29 > F.S. \geq 1,10$
1,10		Correspondendo ao nível de emergência	$1,09 > F.S.$

As análises de estabilidade foram realizadas utilizando o *software* Slide2 versão 9.005 desenvolvido pela empresa canadense Rocscience. Na modelagem, foram consideradas as poropressões obtidas pela linha freática inferida para cada um dos níveis de controle. Para o cálculo do F.S. determinístico foi adotada a metodologia proposta por Morgenstern-Price, a qual calcula o equilíbrio de forças e momentos, sendo considerada rupturas do tipo circular com aproximadamente 160.000 superfícies. Já para o cálculo do F.S. probabilístico, foram adotadas 10.000 iterações do método de Monte Carlo, variando-se a coesão e o ângulo de atrito de forma simultânea e recalculando-se as cunhas de ruptura críticas.

Para a avaliação dos F.S. probabilísticos, foram variados apenas os parâmetros de resistência efetivos do aterro compactado, sendo considerado o intervalo de três desvios padrão positivo e negativo em relação a média ($\mu \pm 3\sigma$). O intervalo adotado corresponde a aproximadamente 99,8% dos valores de ocorrência do histograma considerando uma distribuição normal (Figura 4), permitindo assim, uma avaliação de praticamente a totalidade de ocorrência dos valores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 apresenta a seção tipo com as freáticas obtidas para os níveis de controle determinísticos, considerando os limites de referência para os F.S. citados anteriormente. Já a Figura 7 apresenta as medidas relativas aos valores dos níveis de controle determinísticos para cada um dos instrumentos. Para o MNA-1 observa-se uma diferença de 4,8 m.c.a. entre o nível auxiliar (F.S. = 1,50) e o nível de controle emergência (F.S. = 1,10). Já o MNA-2 apresentou leituras a partir dos níveis de atenção, alerta e emergência (detalhe das freáticas na Figura 6) com variação de 2,5 m.c.a. entre o menor e o maior nível.

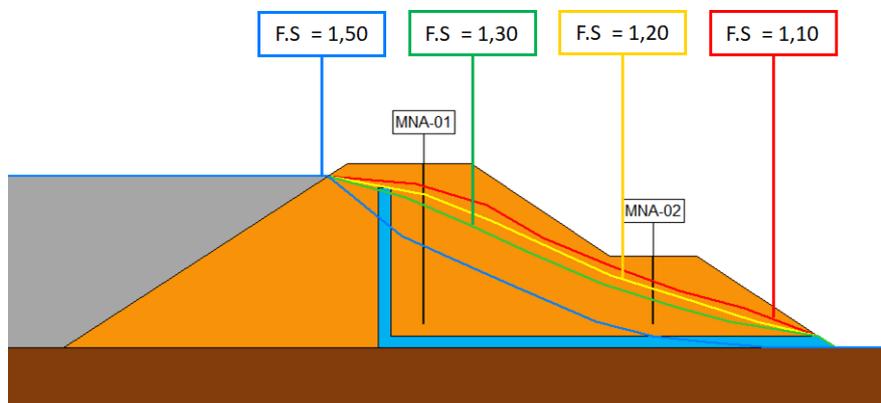


Figura 6. Freáticas obtidas para os níveis de controle.

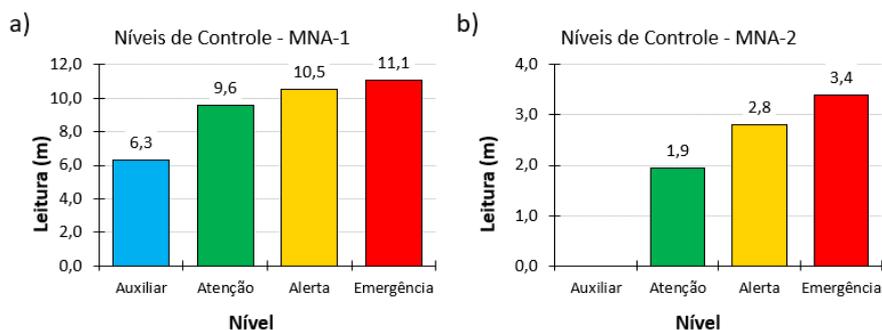


Figura 7. Níveis de controle determinísticos: a) MNA-1; e b) MNA-2.

Considerando os níveis de controle determinísticos obtidos com os parâmetros médios do aterro compactado ($c' = 10$ kPa e $\phi' = 24^\circ$), foram realizadas as análises probabilísticas recalculando as cunhas de ruptura para cada uma das combinações de parâmetros. As distribuições dos F.S. obtidos são apresentados na Figura 8. Na mesma figura também é indicado a isolinha de F.S. = 1,00, que representa os resultados em que a estrutura teria colapsado, caso atingisse um nível de controle. Como pode ser observado, para o nível de emergência (F.S. = 1,10) a probabilidade de falha é mais elevada do que para os outros níveis, uma vez que o histograma deste cenário possui maior área posicionada à esquerda da linha de referência de F.S. = 1,00.

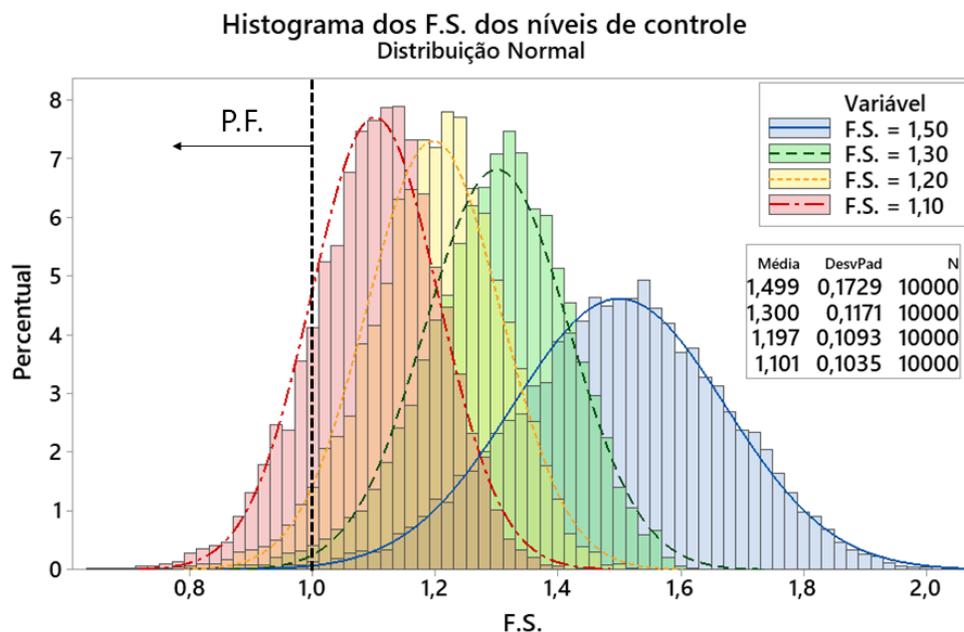


Figura 8. Histograma dos F.S. dos níveis de controle e probabilidade de rupturas.

Por fim, foram calculadas as probabilidades de ruptura para cada um dos níveis de controle obtidos, considerando uma distribuição do tipo normal do F.S. Numericamente, a Probabilidade de Falha (P.F) pode ser definida como a área da curva de distribuição cujos valores de F.S. são inferiores a 1,00 ($F.S. < 1,00$). A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos, que indicaram que a probabilidade de falha varia de 0,19% para o nível auxiliar até 16,46% para o nível de emergência. Sendo assim, para todos os níveis de controle determinísticos, foram obtidas probabilidade de falhas muito superiores ao aceitável (10^{-6} conforme Whitman, R. V., 1984), sendo 20 vezes acima para o nível auxiliar e cerca de 1600 vezes para o nível emergência.

Tabela 4. Probabilidade de ruptura para cada um dos níveis de controle.

F.S.	Nível de controle	P.F.	Razão entre a P.F. e o limite aceitável (10^{-6})
1,50	Auxiliar	0,19%	19
1,30	Atenção	0,52%	52
1,20	Alerta	3,57%	357
1,10	Emergência	16,46%	1.646

5 CONCLUSÕES

O presente artigo teve por objetivo avaliar os resultados de análises probabilísticas, no que se referem aos valores de probabilidade de falha, atrelados às análises determinísticas utilizadas para definição de níveis de controle de instrumentação geotécnica. O intuito foi promover uma reflexão sobre a representatividade dos níveis de controle definidos por análises determinísticas. Os resultados mostram que as probabilidades de ruptura podem ser inaceitáveis, mesmo em condições classificadas como “normal”, indicando que a metodologia de definição de níveis de controle, comumente utilizada no meio geotécnico, tem limitações que podem impactar no julgamento quanto a segurança da estrutura.

Como recomendação, destaca-se que de forma a contornar as limitações dos níveis de controle determinísticos, existem outras abordagens para determinar os níveis de controle descritos na bibliografia como: (i) utilização de dados históricos das leituras dos instrumentos para a definição de intervalos de confiança/recorrência e identificação de leituras fora do esperado (FUSARO, 2007); (ii) análise estatística de correlação entre as leituras dos instrumentos e dados externos (nível do reservatório, pluviometria, etc) para a determinação uma zona de aceitação de leituras com base nos limites compreendidos pelos valores de referência inferior e superior (KUPERMAN *et al.*, 2003); (iii) aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina, inteligência artificial e modelos híbridos para a previsão de leitura e detecção de valores fora do esperado (BEIRANVAND, B., & RAJAEI, T., 2022); dentre outras metodologias. Cabe destacar que os métodos aqui citados se aplicam tanto para barragens de mineração quanto para barragens de água e/ou demais estruturas geotécnicas, podendo ser aplicado também para outros modos de falha.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Pimenta de Ávila pelo apoio e incentivo na elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2007). D422-63: *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2018). D4318-17e1: *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2020). D4767-11: *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2020). D7181-20: *Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2020). D792-20: *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*.
- Assis, A. P. (2020). *Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice*. Soil and Rocks, 43(3), 311-336.
- Beiranvand, B., & Rajaei, T. (2022). *Application of artificial intelligence-based single and hybrid models in predicting seepage and pore water pressure of dams: A state-of-the-art review*. Advances in Engineering Software, 173, 103268.
- Campello I. C.; Ávila, J.P.; Vecchi, A N.; e Machado, J. L. (2019). Variabilidade de Parâmetros Geotécnicos. XXXII *Seminário Nacional de Grandes Barragens*. CBDB.
- Fusaro, T.C. 2007. *Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau*. Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Kuperman, S.L.; Moretti, M.R.; Cifu, S.; Celestino, T.B.; Re, G.; Zoellner, K.; Pínfani, J. C.; Carneiro, E. F.; Rossetto, S. L. G.; Reigada, R. P. (2003). Critérios para a fixação de valores limites da instrumentação civil de barragens de concreto e de terra. *Comitê Brasileiro de Barragens – XXV Seminário de Grandes Barragens*, Salvador - BA, pp-81-96.
- Marinaro, R. D. A. (2022). *Proposta de metodologia para definição dos níveis de controle da instrumentação associados aos modos de falha: estudo de caso em uma barragem para disposição de rejeito de mineração*.
- Penna, D., Marinaro, R., Lopes, M., e Carmo, A. (2017). *Carta de risco como ferramenta na gestão de segurança de barragens*. Belo Horizonte, pp. 1-15.
- Skempton A W (1954). The pore water coefficient A and B. *Geotechnique* 4: 143–147.
- Whitman, R. V. (1984). Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(2), 143-188.