DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/65

Variabilidade Espacial do Ru em Barragens de Terra Alteadas a Jusante: Uma Abordagem Numérica para Maior Representatividade nas Análises de Equilíbrio Limite

Fabio Silva
Gerente de Engenharia, JETbr, Belo Horizonte, Brasil, fsilva@jetbr.eng.br

Mateus Forcelini
Engenheiro Geotécnico, DF+ Engenharia, Porto Alegre, Brasil, mforcelini@dfmais.eng.br

Felipe Vianna Amaral de Souza Cruz
Gerente de Engenharia, DF+ Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, fcruz@dfmais.eng.br

Luciana Praça
Coordenadora de Projetos, DF+ Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, lpraca@dfmais.eng.br

RESUMO: O presente trabalho investiga a variabilidade espacial do coeficiente de poropressão neutra (Ru) em barragens de terra alteadas a jusante, utilizando uma abordagem numérica para compreender a distribuição setorial das poropressões e demonstrar as limitações associadas ao uso de um valor único de Ru nas análises de equilíbrio limite. O estudo foi desenvolvido a partir de modelagens semi-acopladas de fluxo e deformação, representando as etapas de alteamento e as condições de carregamento ao longo da vida útil da estrutura. As análises numéricas foram conduzidas em modelos bidimensionais representativos de 4 seções transversais típicas da barragem, considerando parâmetros geotécnicos obtidos por ensaios de laboratório e de campo e refinados por calibração a partir de dados de instrumentação incluindo variações de permeabilidade, anisotropia e compressibilidade dos materiais constituintes. A calibração das condições de fluxo dos modelos foi realizada com base em dados piezométricos e leituras históricas de monitoramento, garantindo representatividade nas condições de contorno e comportamento hidráulico do maciço. Os resultados indicam que o Ru não se distribui de forma uniforme, apresentando zonas de maior concentração de poropressão nas camadas internas maisargilosas com reduçao gradual nas interfaces de contato com materiais mais permeáveis, e próximo das fases dos taludes. Essa heterogeneidade espacial é diretamente influenciada pela sequência construtiva, pelo regime de drenagem e pela geometria do alteamento, variando significativamente entre os diferentes estágios de construção. Quando comparadas com análises de equilíbrio limite convencionais baseadas em um valor único de Ru, as simulações indicaram que esse procedimento simplificado pode resultar em superestimação conservadora das poropressões ativas, levando à subavaliação dos fatores de segurança globais e a interpretações excessivamente restritivas sobre a estabilidade da estrutura. Em contrapartida, a abordagem numérica zonificada, ao representar adequadamente as condições hidráulicas e estruturais locais, permite reduzir o conservadorismo sem comprometer a segurança, fornecendo estimativas mais realistas dos fatores de segurança e dos gradientes hidráulicos. A partir dessa análise, foi possível propor um procedimento de zoneamento de Ru, correlacionando as regiões do maciço segundo comportamento hidráulico e resposta mecânica, o que se mostrou particularmente eficaz para barragens com sistemas de drenagem internos e alteamentos em diferentes fases de consolidação. Conclui-se que a consideração da variabilidade espacial do Ru constitui uma ferramenta de grande relevância para o avanço das metodologias de estabilidade de barragens de terra, proporcionando maior confiabilidade nas análises e permitindo o uso mais racional de fatores de segurança e critérios de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Risk-Informed, Performance-Based, Barragem Rejeito de Fosfato

ABSTRACT: This study investigates the spatial variability of the pore pressure coefficient (Ru) in downstream-raised earth dams, employing a numerical approach to understand the sectoral distribution of pore pressures and demonstrate the limitations associated with using a single Ru value in limit equilibrium analyses. The study was developed through semi-coupled flow and deformation modeling, representing the raising stages and loading conditions throughout the structure's service life. Numerical analyses were conducted on

two-dimensional models representing four typical cross-sections of the dam, considering geotechnical parameters obtained from laboratory and field tests and refined through calibration based on instrumentation data, including variations in permeability, anisotropy, and compressibility of the constituent materials. The calibration of the flow conditions was performed based on piezometric data and historical monitoring readings, ensuring representativeness in the boundary conditions and hydraulic behavior of the dam body. The results indicate that Ru is not uniformly distributed, showing zones of higher pore pressure concentration in the internal, more clayey layers, with a gradual reduction at contact interfaces with more permeable materials and near slope faces. This spatial heterogeneity is directly influenced by the construction sequence, drainage regime, and raising geometry, varying significantly between different construction stages. When compared to conventional limit equilibrium analyses based on a single Ru value, the simulations indicated that this simplified procedure may result in a conservative overestimation of active pore pressures, leading to an underestimation of global factors of safety and excessively restrictive interpretations of structural stability. In contrast, the zoned numerical approach, by properly representing local hydraulic and structural conditions, allows for a reduction in conservatism without compromising safety, providing more realistic estimates of safety factors and hydraulic gradients. Based on this analysis, it was possible to propose an Ru zoning procedure, correlating regions of the dam body according to hydraulic behavior and mechanical response, which proved particularly effective for dams with internal drainage systems and raisings at different stages of consolidation. It is concluded that considering the spatial variability of Ru constitutes a highly relevant tool for advancing earth dam stability methodologies, providing greater reliability in analyses and allowing for a more rational use of safety factors and design criteria.

KEYWORDS: Risk-Informed; Performance-Based; Phosphate Tailings Dam

1 INTRODUÇÃO

O coeficiente de poropressão Ru, conforme definido por Bishop (1954), é amplamente utilizado em análises de estabilidade de barragens de terra como forma simplificada de incorporar o efeito das poropressões ativas sobre a resistência mobilizável do maciço em condições de construção. Em sua formulação mais usual, Ru é definido como a razão entre a poropressão total e a tensão vertical total no ponto analisado. Apesar de sua natureza heurística, o emprego de um valor único de Ru para todo o aterro compactado acima da superfície freática implica assumir distribuição espacial com variação uniforme das poropressões, hipótese que raramente é compatível com o comportamento hidráulico real de barragens alteadas a jusante, especialmente quando existem filtros internos, tapetes drenantes, contrastes de permeabilidade, anisotropia de permeabilidade e estágios distintos de adensamento.

Em estruturas constituídas de materiais de alto grau de saturação e submetidas a alteamentos sucessivos, os incrementos rápidos de tensão total podem gerar excessos de poropressão relevantes mesmo em zonas nominalmente não saturadas do maciço, sobretudo quando a drenagem interna não é suficiente para dissipar integralmente a água entremeada na matriz do solo entre etapas construtivas sucessivas. Nessas condições, a adoção de um único Ru tende a mascarar a variabilidade do fenômeno e pode levar a interpretações excessivamente conservadoras da estabilidade global.

Este artigo apresenta um estudo numérico desenvolvido para uma barragem de terra alteada a jusante, no qual se investigou a distribuição espacial do Ru em etapas sucessivas de alteamento futuro, simuladas por meio de análises de tensão-deformação por elementos finitos. O objetivo central é demonstrar, com base em modelagem numérica calibrada com instrumentação de campo, que a utilização de um valor único de Ru no maciço compactado acima do nível freático constitui simplificação demasiadamente conservadora para o caso em análise, e que uma abordagem setorizada permite estimativas mais realistas das poropressões e dos fatores de segurança.

2 CONTEXTO DO ESTUDO DE CASO

O estudo foi derivado de análises numéricas de tensão-deformação realizadas no âmbito do projeto de alteamento de uma barragem de rejeitos de fosfato da atual elevação de crista de 950 m, para 960 m. A estrutura

é uma barragem alteada a jusante, originalmente implantada com crista na elevação 940 m, com alteamentos subsequentes até a condição atual, além de etapas futuras previstas no projeto executivo, os quais levarão a crista da estrutura para a El. 960 m. O maciço inicial foi concluído em 2015 e, durante as obras do alteamento da elevação 950 m, iniciadas em 2019, foram observadas fissuras no aterro, bem como deformações graduais e prolongadas por meses, o que motivou campanhas complementares de investigação e o desenvolvimento de estudos numéricos específicos.

Durante a execução de etapas anteriores de alteamento, foram observados comportamentos compatíveis com dissipação de excessos de poropressão em diversos piezômetros, deslocamentos prolongados em placas de recalque e quebras de instrumentos instalados no maciço, indícios consistentes de deformação no tempo e elevada compressibilidade dos aterros compactados. Ensaios laboratoriais realizados nos materiais do maciço corroboraram essa interpretação, indicando alta compressibilidade nos materiais adotados na construção. As análises numéricas completas do projeto foram conduzidas em três seções transversais representativas, todas selecionadas por sua representatividade das condições geológico-geotécnicas do maciço e da fundação. Entretanto, no presente estudo serão avaliados apenas os resultados da seção de maior altura do barramento.

3 METODOLOGIA

O estudo baseou-se em um modelo numérico bidimensional de tensão-deformação desenvolvido no software PLAXIS 2D, adotando abordagem semi-acoplada, também descrita na literatura como *one-way coupling*. Nessa estratégia, o campo de poropressões é inicialmente resolvido a partir das condições de contorno, da sequência construtiva e das condutividades hidráulicas dos materiais; em seguida, as poropressões calculadas são aplicadas à análise mecânica para obtenção dos estados de tensão, deformação e deslocamento (Beck et al., 2020).

A construção do modelo contemplou todo o histórico da estrutura, desde as escavações que precederam a implantação do maciço inicial até o alteamento futuro programado. A reprodução do histórico construtivo foi organizada de modo a correlacionar os *time-steps* do modelo com datas reais de obra, permitindo comparação direta entre resultados simulados e leituras históricas da instrumentação com o auxílio de planilha eletrônica. A calibração foi realizada simultaneamente para as três seções da barragem, o que permitiu uma aproximação mais consistente das condições hidráulicas reais aferidas em campo.

A Figura 1 apresenta a geometria do modelo numérico desenvolvido para a estrutura em questão, bem como a compartimentação interna de materiais de construção e unidades geológico-geotécnicas de fundação.

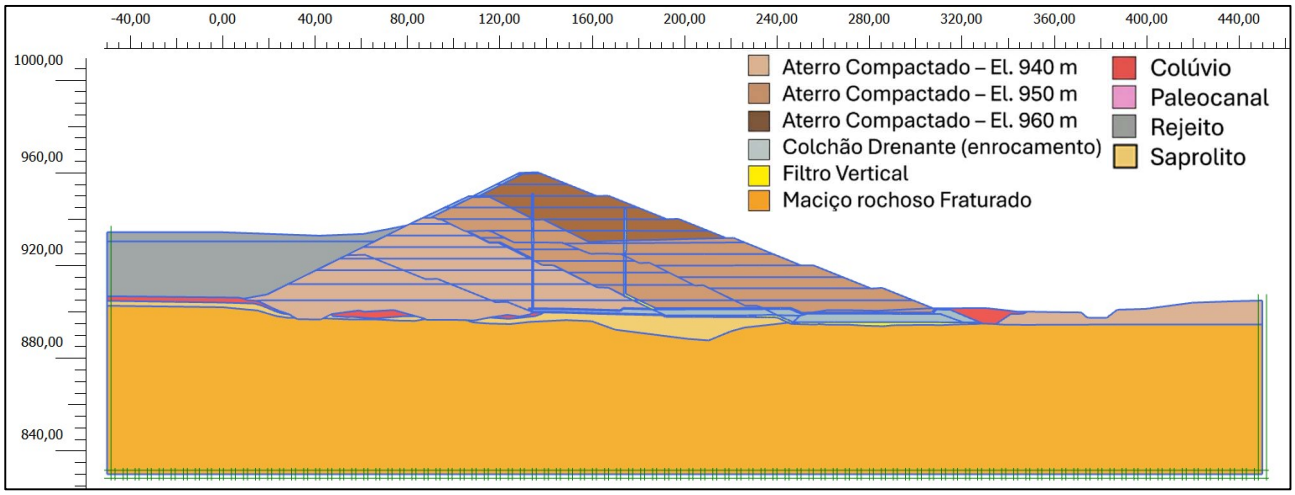


Figura 1- Geometria do modelo numérico

3.1 Calibração das Condições Hidráulicas do Modelo

A calibração do comportamento hidráulico do aterro e da fundação foi conduzida a partir da reprodução numérica das condições de poropressão indicadas pelas leituras históricas de piezômetros (PZs e PZEs) e indicadores de nível d'água (INAs), bem como pela coerência com o padrão deformacional indicado pelas

placas de recalque e medidores de recalque magnéticos. No caso dos três aterros compactados que compõem o barramento (AT 940 m, AT 950 m e AT 960 m), a calibração resultou em permeabilidades ligeiramente distintas, sendo o AT 950 m o material menos permeável, com condutividade hidráulica horizontal da ordem de 1×10^{-6} cm/s e vertical de 1×10^{-7} cm/s, e o AT 940 m o mais permeável, com $k_x = 4{,}4\times10^{-5}$ cm/s e $k_y = 4{,}4\times10^{-6}$ cm/s.

Em razão do elevado grau de saturação reportado durante os trabalhos de compactação do maciço da barragem, superior a 95%, adotou-se, em favor da segurança, condição de saturação plena do aterro compactado acima da superfície freática. No modelo, o material foi lançado com 100% de saturação por meio da formulação Undrained (A) do PLAXIS, de modo que incrementos de tensão total suficientemente rápidos para impedir a drenagem da água entremeada na matriz do solo gerassem excessos de poropressão. Trata-se de hipótese deliberadamente conservadora, por implicar condição mais severa do que aquela normalmente esperada em campo para parte do maciço acima da linha freática.

3.2 Calibração das Condições Hidráulicas do Modelo

Para o objetivo específico deste artigo, tomou-se a etapa futura final de alteamento prevista no estudo do projeto e subdividiu-se o acréscimo total de 30 m de altura de alteamento em seis fases de 5 m, contabilizadas a partir de uma cota inicial CI, totalizando 150 dias de construção, equivalentes a uma taxa média de alteamento de 20 cm/dia. Em cada etapa, foram extraídas as tensões verticais totais (σ_{yy}) e as poropressões ativas (P_{active}) em todos os *stress points* localizados nos aterros compactados acima do nível freático. A filtragem e organização desses dados foram realizadas em planilha Excel, com exclusão de pontos pertencentes à fundação, aos dispositivos drenantes e às zonas já saturadas por fluxo permanente.

Com base nesses dados, foi calculado o coeficiente Ru ponto a ponto para cada fase de alteamento. Em seguida, foram gerados histogramas das distribuições do parâmetro, ajustadas no software Minitab, funções de distribuição acumulada com ajuste do tipo log normal. Sobre essas curvas foram ainda traçadas linhas verticais de referência em valores de Ru = 0,10 e Ru = 0,20, com o objetivo de quantificar a fração dos pontos que ultrapassam limiares usualmente empregados de forma simplificada em análises de equilíbrio limite.

3.3 Parâmetros Geomecânicos

A Tabela 1 sintetiza os parâmetros geomecânicos adotados nos modelos numéricos. Destaca-se que os materiais de aterro foram simulados com o modelo constitutivo elasto-plástico Hardening Soil (Schanz et al., 2000), enquanto para os demais materiais foi adotado o modelo Elastico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Os módulos de deformabilidade apresentados para os materiais simulados com o Hardening Soil foram calculados para uma tensão de referência p_{ref} = 100 kPa. Ademais, adotou-se a seguinte relação fixa entre os módulos de deformabilidade secante, de compressibilidade e de descarregamento/recarregamento: $E_{50}=E_{oed}=E_{ur}/3$. A tabela apresenta ainda a condutividade hidráulica média inicialmente obtida a partir de ensaios de infiltração ($k_{inicial}$), bem como os valores finais obtidos no modelo, pós calibração com dados de instrumentação (k_{final}).

Tabela 1 – Síntese dos parâmetros geomecânicos dos materiais considerados no modelo numérico

Material	γ_{sat} (kN/m³)	c' (kPa)	φ' (°)	E_{50} (MPa)	ν	m	$k_{inicial}$ (m/s)	k_{final} (m/s)	k/k_h
Aterro compactado EI 940	18	20	28	5	0,3	0,6	$1{,}10\times10^{-8}$	$4{,}41\times10^{-9}$	0,1
Aterro compactado EI 950	18,6	24	29,5	6,5	0,3	0,5	$1{,}19\times10^{-7}$	$1{,}00\times10^{-9}$	0,1

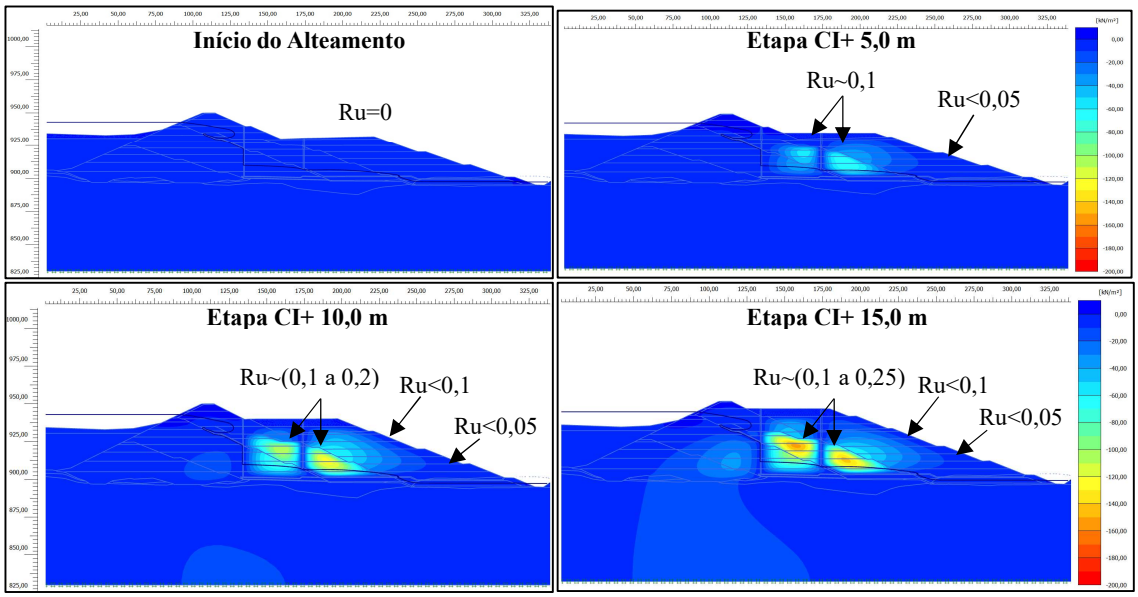
Aterro compactado EI 960	19	30	29,5	7,8	0,3	0,9	$3{,}63\times10^{-7}$	$2{,}00\times10^{-8}$	0,1
Saprolito	18,6	20	25	50	0,33	—	$7{,}86\times10^{-7}$	$7{,}86\times10^{-7}$	1
Paleocanal	14,9	10	31	25	0,33	—	$2{,}01\times10^{-7}$	$2{,}01\times10^{-7}$	1
Maciço rochoso fraturado	27	100	40	180	0,33	—	$1{,}00\times10^{-7}$	$1{,}00\times10^{-7}$	1
Solo residual	17	20	30	25	0,33	—	$6{,}27\times10^{-7}$	$6{,}27\times10^{-7}$	1
Colúvio	17,1	21	31	10	0,33	—	$9{,}10\times10^{-7}$	$1{,}00\times10^{-7}$	1
Rejeito	19,3	0	33	10	0,33	—	$1{,}00\times10^{-7}$	$1{,}00\times10^{-7}$	1
Filtro vertical	17	5	35	30	0,33	—	$1{,}00\times10^{-4}$	$1{,}00\times10^{-4}$	1
Colchão drenante (enrocamento)	22	5	45	30	0,33	—	$1{,}00\times10^{-2}$	$1{,}00\times10^{-2}$	1

4 RESULTADOS

4.1 Evolução dos Excessos de Poropressão e Distribuição Espacial de Ru

Os resultados indicam que os picos de Ru não ocorrem na fase final de construção, mas em etapas intermediárias do alteamento. Esse comportamento decorre do fato de que, à medida que a crista se eleva, a praça de trabalho torna-se progressivamente mais estreita. Como consequência, a projeção lateral do bulbo de tensões das novas camadas passa a gerar incrementos de tensão total relativamente menores no aterro previamente lançado e na fundação subjacente. Em paralelo, parte dos excessos de poropressão gerados nas etapas anteriores já se encontra em dissipação. O efeito combinado desses dois mecanismos interrompe o crescimento cumulativo dos picos de poropressão a partir de determinado estágio da construção.

Esse resultado é particularmente relevante porque contraria a expectativa intuitiva de que a fase final de alteamento seja sempre a condição hidráulica mais desfavorável. No caso estudado, a condição mais crítica em termos de Ru está associada a estágios intermediários em que coexistem: (i) elevada taxa de incremento de tensões; (ii) menor tempo acumulado de dissipação; e (iii) geometria de praça de compactação ainda suficientemente larga para projetar incrementos de tensão significativos sobre parcelas extensas do maciço, como pode ser observado na Figura 2.



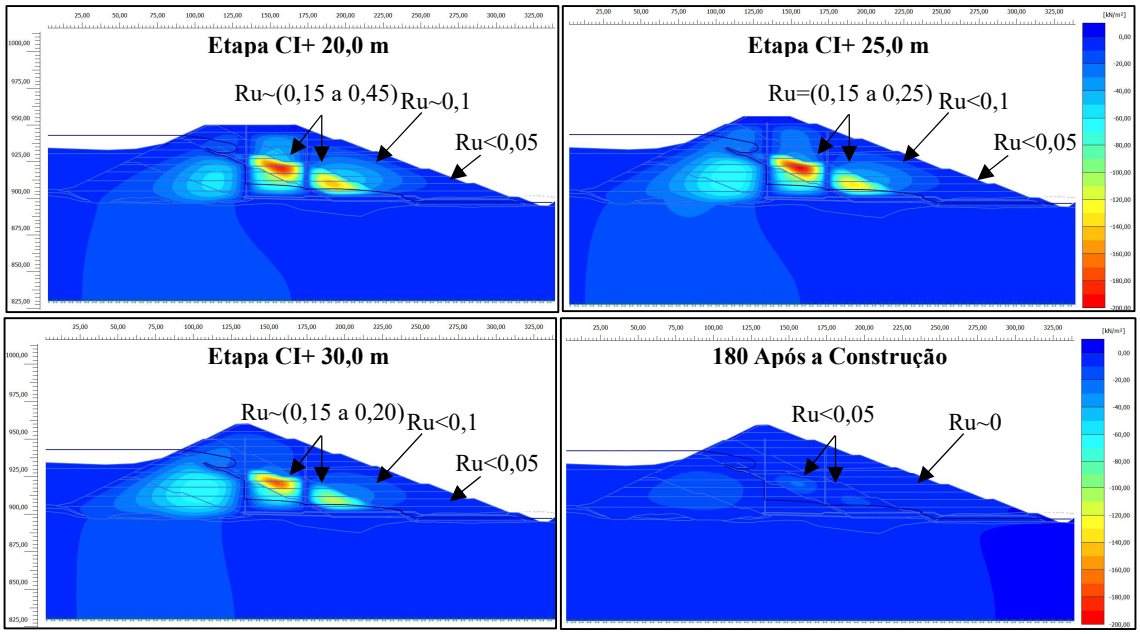


Figura 2- Evolução dos excessos de poropressão e do coeficiente Ru ao longo das etapas de alteamento

A distribuição espacial do Ru acima da superfície freática mostrou-se patentemente não uniforme em todas as etapas simuladas. Os maiores valores concentram-se em zonas internas mais confinadas do aterro, especialmente nas faixas menos permeáveis, nas quais a dissipação é mais lenta. Em contrapartida, regiões adjacentes aos dispositivos de drenagem interna, como filtros e transições drenantes, apresentam valores sensivelmente menores, em razão da maior capacidade de descarga hidráulica e da redução do caminho de fluxo. As bordas do maciço em contato com a atmosfera apresentam comportamento semelhante, atuando como fronteiras drenantes e favorecendo a dissipação dos excessos de poropressão.

Essa heterogeneidade confirma que Ru não pode ser simulado como uma condição uniforme do aterro, mas sim como uma variável temporária resultante da interação entre geometria, compartimentação interna, anisotropia de permeabilidade, condição de saturação e cronologia construtiva.

Os histogramas de Ru obtidos a partir dos *stress points* do modelo revelam distribuições assimétricas, com predominância de valores baixos e cauda à direita associada às zonas localizadas de maior concentração de poropressão. O ajuste log normal mostrou-se adequado, embora limitado, para representar esse padrão, permitindo construir funções de distribuição acumulada que facilitam a leitura probabilística dos resultados por etapa de alteamento.

A análise dessas curvas indica que, durante a maior parte da construção, os pontos com Ru superiores a a 0,20 representam fração inferior a 10% do total. Tal resultado é ainda mais relevante, haja vista que foi obtido em um cenário deliberadamente conservador, no qual todo o aterro compactado acima da linha freática foi considerado plenamente saturado durante toda a construção. Mesmo sob essa hipótese, os valores elevados de Ru permanecem restritos a regiões pontuais, e não ao conjunto do maciço. A Figura 3 apresenta a sobreposição dos histogramas de Ru, enquanto a Figura 4 apresenta as FDAs obtidas.

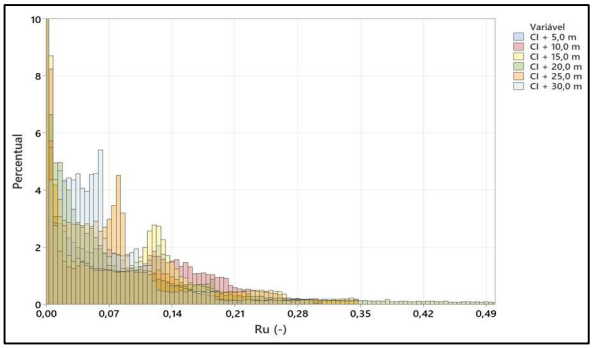


Figura 3- Histogramas sobrepostos de Ru, considerando apenas os elementos finitos acima do nível freático

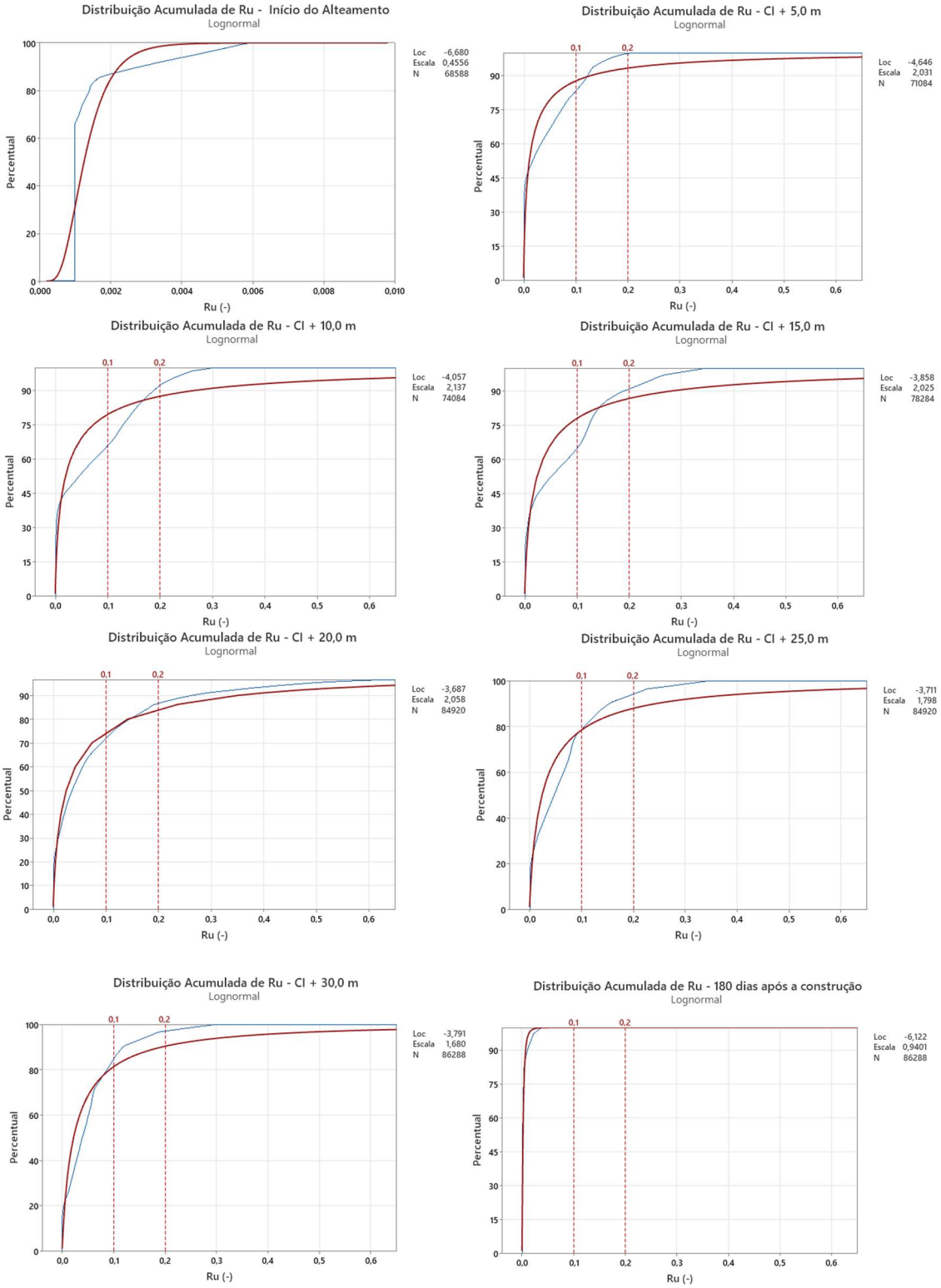


Figura 4- Histogramas sobrepostos de Ru, considerando apenas os elementos finitos acima do nível freático para todas as etapas de alteamento futuro

4.2 Implicações para as Análises de Estabilidade

As análises de equilíbrio limite baseadas em um valor único de Ru pressupõem que toda a zona potencialmente não saturada do aterro esteja submetida ao mesmo fator de poropressão relativa, o que, à luz

dos resultados obtidos, não representa adequadamente a condição do caso estudado. Quando se impõe ao maciço inteiro um valor único de Ru equivalente aos picos localizados identificados em pequenas parcelas do modelo, a consequência direta é a superestimação das poropressões totais e, portanto, a obtenção de fatores de segurança globais mais desfavoráveis durante a construção, levando a taxas de construção mais lentas, que implicam em custos adicionais significativos ao proprietário da estrutura.

Isso não significa que a abordagem simplificada deva ser descartada em qualquer situação. Em contextos de dados escassos ou em análises preliminares, a adoção de Ru único pode continuar sendo útil como estimativa conservadora. No entanto, para barragens com histórico construtivo conhecido, amplo histórico de instrumentação disponível e sistemas de drenagem interna bem definidos, os resultados aqui obtidos indicam que uma abordagem setorizada, definida com base em modelagem numérica calibrada, permite a tomada de decisões construtivas mais econômicas, sem comprometer a segurança.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo evidencia que a interpretação do Ru deve estar necessariamente vinculada ao processo físico que lhe dá origem. No caso analisado, o maciço compactado foi construído com elevado grau de saturação e apresenta material de alta compressibilidade, o que favorece a geração de excessos de poropressão sob carregamento rápido. Ainda assim, os resultados mostram que a geometria do alteamento, a presença de interfaces drenantes e a dissipação parcial entre etapas impedem que o Ru elevado se propague de forma generalizada por todo o maciço.

É importante destacar que essa conclusão é em parte condicionada por características específicas da barragem em questão. A compartimentação interna do aterro, a existência de sistemas de drenagem, as permeabilidades calibradas e a própria geometria do alteamento influenciam fortemente a resposta obtida. Portanto, embora o estudo sustente de forma contundente a crítica ao uso indiscriminado de um Ru único, a extrapolação quantitativa dos limiares observados para outras estruturas deve ser feita com cautela e sempre sustentada por análises de tensão-deformação bem calibradas.

Os resultados obtidos sustentam a relevância de integrar modelagem numérica calibrada e análise estatística para a avaliação do coeficiente Ru em barragens de terra. Como desdobramentos deste trabalho, recomenda-se: (i) aplicar o mesmo procedimento a outras estruturas, de modo a verificar a recorrência dos padrões identificados; (ii) investigar a influência da taxa de alteamento sobre a evolução das distribuições de Ru; (iii) avaliar se os padrões aqui identificados também ocorrem em analises mais complexas com fluxo totalmente acoplado e deposição saturada das camadas de aterro; e (iv) desenvolver critérios objetivos para conversão das distribuições contínuas de Ru em zonas de projeto compatíveis com rotinas de equilíbrio limite. Essa linha de investigação pode contribuir para análises de estabilidade mais realistas, por meio da redução de simplificações que podem distorcer a interpretação do desempenho de estruturas em alteamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas DF+ Engenharia e JETbr Engenharia pela autorização para uso dos dados apresentados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BECK, M.; RINALDI, A. P.; FLEMISCH, B.; et al. Accuracy of fully coupled and sequential approaches for modeling hydro- and geomechanical processes. Computational Geosciences

BISHOP, A. W. The use of pore-pressure coefficients in practice. Géotechnique, London, v. 4, n. 4, p. 148-152, 1954.

SCHANZ, T.; VERMEER, P. A.; BONNIER, P. G. The hardening soil model: Formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Amsterdam, p. 281-296, 1999.