

Análise tensão-deformação para a definição de nível de controle para deslocamentos em barragens

Lucas Pinheiro da Silva
Engenheiro Civil, Tellus Company, Belo Horizonte, Brasil, lpinheiro@tellus company.com.br

Laura Fernandes Machado
Engenheira Civil, Tellus Company, Belo Horizonte, Brasil, lmachado@tellus company.com.br

Thiago Luiz Coelho Morandini
Engenheiro Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, thiagomorandini@cetefmg.br

Luiz Felipe Caríssimo Soares
Engenheiro Civil, Tellus Company, Belo Horizonte, Brasil, lsoares@tellus company.com.br

RESUMO: O presente trabalho objetiva a determinação de níveis de controle de deslocamento a partir de análises tensão-deformação de uma barragem construída em aterro compactado para a disposição de rejeitos. Para desenvolvimento do estudo, foi elaborada uma seção transversal hipotética na qual foram simuladas etapas sucessivas de construção/alteamento do maciço e espigotamento de rejeito no reservatório. Além disso, também foi realizado um estudo de sensibilidade no parâmetro de deformabilidade da litologia mais relevante no estudo tensão-deformação. Como principais resultados, foram determinados os níveis de controle para os estágios de implantação e operação da estrutura. O estudo possibilitou identificar a sensibilidade dos parâmetros de deformabilidade dos diferentes materiais no modelo avaliado. Por fim, ressalta-se que, a definição de níveis de controle para barragens não deve ser estabelecida unicamente sob a avaliação dos resultados meramente numéricos, faz-se necessária uma avaliação análise interdisciplinar que inclua a condição integral da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Análise numérica, Tensão-deformação, Strength Reduction Factor (SRF), Equilíbrio Limite.

ABSTRACT: The present paper aims to determine displacement control levels based on stress-strain analysis of a dam compacted landfill for disposal of tailings. To develop the study, a hypothetical cross-section was elaborated in which successive stages of construction/raising of the mass and tailings dumping into the reservoir were simulated. Furthermore, a sensitivity study was also carried out on the most relevant lithology deformability parameter in the stress-strain study. The main results were determined the control levels for the implantation stages and operation of the structure. The study made it possible to identify the sensitivity of the deformability parameters of the different materials in the evaluated model. Finally, it should be noted that the definition of control levels for dams should not be established solely based on the evaluation of merely numerical results, an interdisciplinary analysis analysis is necessary that includes the integral condition of the structure.

KEYWORDS: Numerical analysis, Stress-strain, Strength Reduction Factor (SRF), Limit Equilibrium.

1 INTRODUÇÃO

A instrumentação para controle e monitoramento de obras geotécnicas constitui parte integrante e indispensável em barragens. O plano de instrumentação, quando bem executado, possibilita o monitoramento, interpretação e avaliação das condições e segurança da estrutura, nas fases de implantação, na operação e durante o fechamento da estrutura, garantindo em todas as condições necessárias de segurança e desempenho.

Dentre os mais diversos fins da instrumentação, Lindquist (1983) e Cruz (1996), apontam como objetivos: verificar as hipóteses, os critérios e os parâmetros adotados em projeto, para possibilitar o aprimoramento da obra; verificar a adequação de métodos construtivos; e, por fim, verificar as condições de segurança das obras e estruturas, para que sejam adotadas medidas corretivas em tempo hábil.

O uso da instrumentação demanda avaliação e análise para a definição dos níveis de controle, ou como cita Cruz (1996), a implantação de instrumentos só é justificável quando preexiste uma definição das grandezas a serem medidas e dos valores considerados normais dessas grandezas.

Para além das boas práticas, conforme a Resolução da ANM nº95 de 2022, a definição de nível de controle para as instrumentações existentes em uma barragem, é requisito legal e deve ser apresentado no Volume III – Registros e controles do Plano de Segurança de Barragens.

A consistência na definição dos referenciais de controle, independente da grandeza avaliada, decorre também da metodologia aplicada e da identificação dos modos de falhas a qual a estrutura está exposta.

Este artigo apresenta como objetivo a definição de níveis para controle de deslocamentos em uma barragem, por meio de análise numérica de tensão-deformação. Para o objetivo discriminado, foi simulada a implantação e operação de uma barragem de mineração, executada em aterro compactado, com rejeito disposto por meio de espigotamento. Essa simulação foi realizada em seção transversal hipotética elaborada, sendo a altura final do barramento de 28 m. A fundação da estrutura é composta pelas seguintes litologias sotopostas: colúvio, solo residual, saprolito e rocha. Foram simuladas etapas sucessivas de construção/alteamento do maciço e espigotamento de rejeito no reservatório.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento das análises tensão deformação foi utilizado o *software* RS2 desenvolvido pela Rocscience. A modelagem numérica seguiu os seguintes critérios:

- Aplicação dos modelos constitutivos Mohr-Coulomb (Elasto perfeitamente-plástico) e *Vertical Stress Ratio* (Elástico);
- Materiais isotrópicos e homogêneos quanto às suas características de resistência e deformabilidade;
- Parâmetros geotécnicos de resistência e deformabilidade definidos a partir de valores típicos para as litologias (CRUZ, 1996);
- Estudos realizados simulando o comportamento efetivo (drenado) dos materiais de maciço e fundação;
- Restrição de movimento lateral e na base da seção devido às camadas de solo/rocha adjacentes, simulada por meio das condições de restrição de deslocamento nos limites das geometrias.

As informações básicas do modelo de elementos finitos desenvolvido para as simulações numéricas, e as características técnicas da barragem do presente estudo são reportadas na tabela a seguir:

Tabela 1 - Informações básicas sobre a modelagem das seções de análise.

Código utilizado	RS2 (Rocscience™)
Tipo de elemento utilizado:	Triângulo de 6 nós
Discretização da malha:	Uniforme
Número máximo de iterações:	500
Tolerância:	0,001
Critério de convergência:	Absolute Force & Energy
Tipo de análise:	Tensões efetivas – Plane strain
Opção de consolidação	None
Cut-off de resistência a tração dos materiais:	1kPa
Estabilidade por elementos finitos:	Shear Strength Reduction (SSR)

Tabela 2 – Características técnicas da barragem

Altura (m)	23,0
Largura das Bermas (m):	6,0
Largura das Bermas (m):	6,0
Inclinação do Taludes	V:H – 1:1,8

A malha de elementos finitos utilizada para analisar a seção, na condição final, é apresentada na Figura 1. Na mesma figura, também, são mostrados os materiais constituintes, as condições de contorno consideradas para a modelagem numérica, sendo: restrições de deslocamentos verticais e horizontais na base do modelo e restrições de deslocamento horizontal nas laterais.

Destaca-se que as análises simuladas nesse trabalho não contemplaram nível d'água e que também foram executadas como “não-acopladas”, ou seja, sem contemplar a consolidação das camadas implantadas e o tempo de implantação de cada estágio.

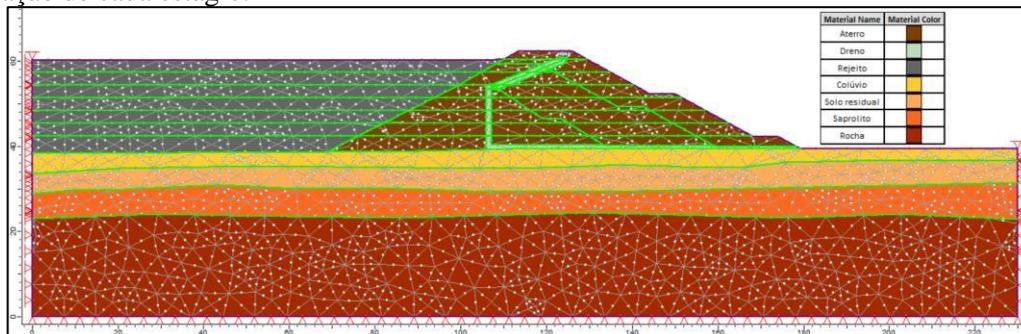


Figura 1. Seção de análise – Estágio 28 – malha de elementos finitos e restrições das análises de tensão-deformação.

Os parâmetros de análise estão discriminados na tabela a seguir.

Tabela 2. Parâmetros de resistência e deformabilidade dos materiais modelados na seção de análise.

Material	Peso específico (kN/m ³)	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Razão de resistência vertical (Su/σ'v)	Módulo de elasticidade (kPa)	Coefficiente de Poisson
Aterro	20	30	10	-	25000	0,30
Dreno	19	35	0	-	45000	0,30
Rejeito	17	-	-	0,20	10000	0,30
Colúvio	18	28	0	-	15000-25000*	0,30
Solo Residual	19	30	5	-	25000	0,30
Saprolito	19	35	10	-	50000	0,30
Rocha	21	35	10	-	50000	0,30

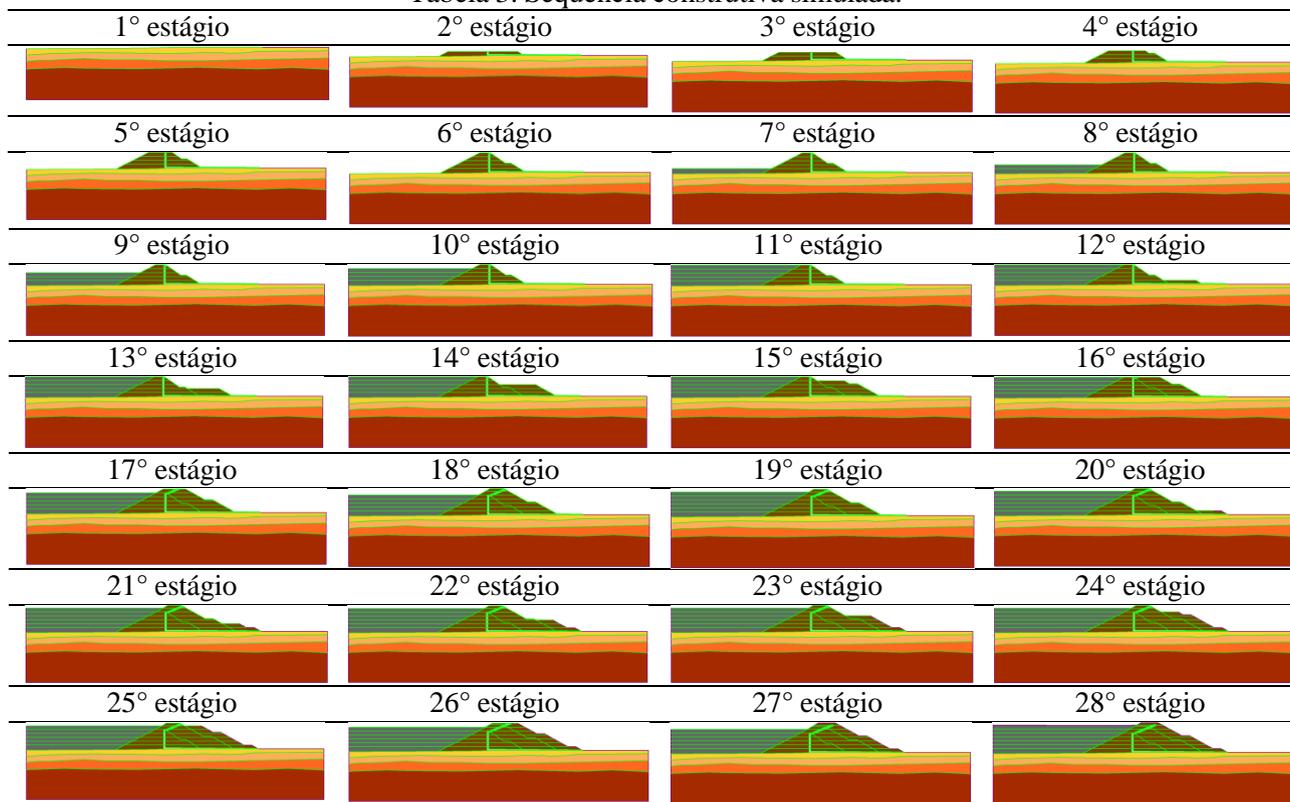
* Módulo de deformabilidade variável, conforme descrito abaixo.

Em função da dificuldade de determinação assertiva dos parâmetros de deformabilidade, principalmente de solos transportados, como os de origem coluvionares, uma vez que são de difícil coleta e moldagem para ensaios laboratoriais e parametrização por ensaios de campo, propôs-se nesse trabalho a verificação de sensibilidade do modelo numérico quanto aos deslocamentos ao longo do processo de implantação e operação no caso da não execução de limpeza de fundação e da existência dessa camada sob o barramento. Dessa maneira, foram simuladas as condições detalhadas anteriormente em modelos variando-se os módulos de elasticidade do colúvio em três hipóteses (denominadas hipótese 1, 2 e 3) sendo os valores de módulos de elasticidade de 15000, 20000 e 25000 kPa, respectivamente.

As análises numéricas de tensão-deformação foram realizadas considerando 28 estágios. No primeiro estágio, foi gerado o estado de tensões geostáticas (chamado neste trabalho de 1º estágio ou estágio *In Situ*) do local, considerando a geometria anterior a implantação da estrutura. Os cinco estágios subsequentes contemplaram a construção do aterro inicial do barramento e do filtro projetado, sem admitir nenhuma limpeza de fundação, sendo cada estágio composto por camadas de 3 m de espessura. Os cinco estágios subsequentes mostraram a o preenchimento do reservatório com rejeito espigotado, também com 3 m de espessura em cada estágio. Nos sete estágios seguintes, simulou-se o alteamento do barramento principal, continuando-se o aterro compactado e o filtro, conforme a geometria, seguido pelo estágio simulando o preenchimento do reservatório a partir de rejeito espigotado. Os sete estágios seguintes também simulam o alteamento do barramento, em camadas de 3 m. Por fim, considerou-se nos 28º estágio o espigotamento da última camada de rejeito na estrutura.

De maneira a propor níveis de controle para deslocamentos, foram monitorados alguns pontos de controle ao longo dos estágios simulados. Foram selecionados três pontos, sobre a camada de colúvio (HQ1), abaixo do centro do barramento, na crista do barramento (HQ2) e na berma da El.45 m (HQ3). O ponto HQ1 deve ser um ponto monitorado através de placas de recalque, e os pontos HQ2 e HQ3, pontos monitorados por meio de marcos superficiais.

Tabela 3. Sequência construtiva simulada.



3 DESENVOLVIMENTO

O estado inicial de tensões totais é apresentado a seguir para a seção de análise. Esse estado foi gerado considerando um campo de tensões (*field stress*) do tipo gravitacional, com razão entre tensões efetivas K_0 igual a 1. Na Figura 2 é exibido o diagrama de tensões máximas horizontais e tensões máximas verticais. Os resultados provenientes do modelo numérico demonstraram consistência de comportamento, sem a presença de zonas com concentração de tensões. No contexto das tensões totais máximas horizontais, os resultados apresentam coerência com a premissa da adoção de um coeficiente de repouso (K_0) igual a 1.

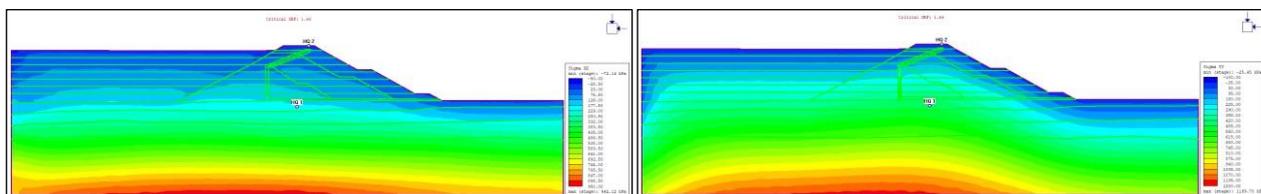


Figura 2. Seção – (a) Tensões totais verticais (b) Tensões totais horizontais – Condição final do barramento (28º estágio).

No modelo simulado é observado (Figura 3) as maiores deformações verticais ocorreram na região central do maciço e do rejeito disposto, corroborando com as conclusões apresentadas por Orgler (1983) *apud* Aires (2006) que indica a existência dos maiores recalques ocorrem a aproximadamente na terceira parte da altura da barragem ($H/3$). As Figura 3 mostra o diagrama de deslocamento vertical máxima.

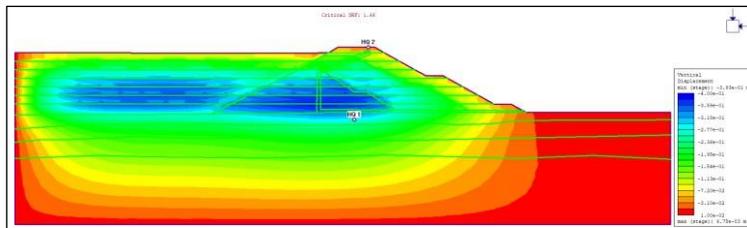


Figura 3. Seção – Deslocamento vertical máximo – Condição final do barramento (28º estágio).

A partir das primeiras análises percebeu-se que a camada de colúvio vinculava as maiores deformações cisalhantes simuladas (Figura 4). Esse fato está associado ao módulo de elasticidade menor, em comparação com os demais materiais da seção transversal. Portanto, foram realizadas análises de sensibilidade da grandeza do módulo de elasticidade. A Figura 4 mostra o diagrama de deformação cisalhante máxima.

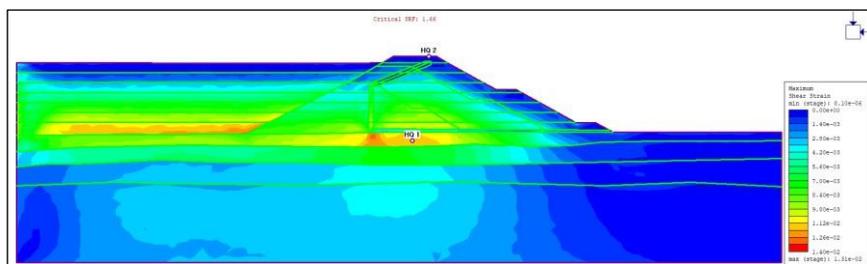


Figura 4. Seção – Deformação cisalhante máxima – Condição final do barramento (28º estágio).

De maneira complementar foi realizada também uma análise por equilíbrio limite do estágio final (28º), utilizando-se o *software* Slide2, também da Rocscience. Como premissa de análise, foram utilizados os métodos de Bishop simplificado, Morgenstern-Price, Spencer e Sarma, utilizando-se superfícies de ruptura não-circulares (Figura 5).

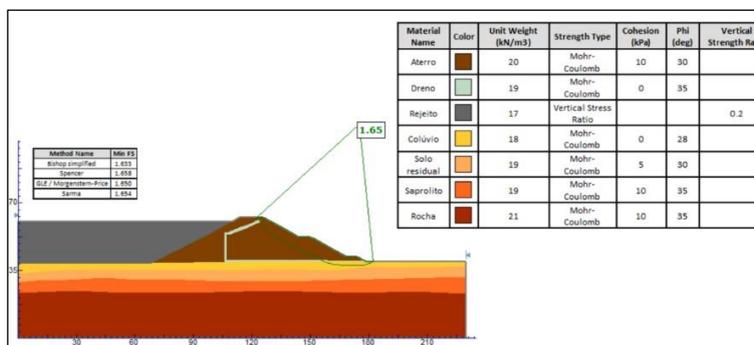


Figura 5. Análise de estabilidade por equilíbrio-limite – Condição final do barramento (28º estágio).

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Deslocamentos verticais e totais

De acordo com o exposto anteriormente, foram realizadas as simulações numéricas considerando diferentes módulos de deformabilidade para a camada de colúvio. A Figura 6 mostra os recalques verticais simulados ao longo dos estágios de cálculo, monitorados no ponto HQ1, usando-se como estágio de referência a condição *in situ* (1º estágio).

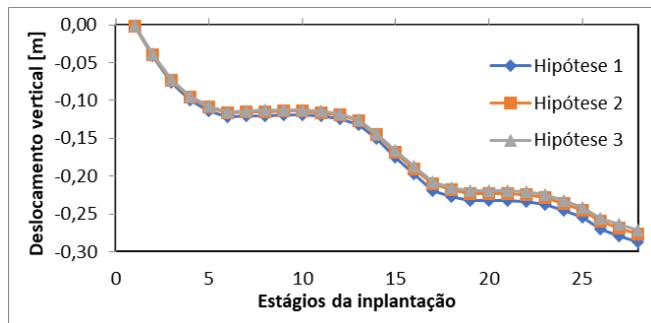


Figura 6. Deslocamento vertical - Sensibilidade do módulo de Elasticidade.

A Tabela 4 apresenta o resumo dos deslocamentos no ponto de monitoramento (HQ1). Verifica-se que o movimento de massa do barramento se apresenta predominantemente no sentido vertical (recalque). Foi percebido que a variação dos módulos de deformabilidade do colúvio, não gerou diferenças substanciais em termos de valores absolutos de deslocamento, apresentando uma diferença de aproximadamente 2 cm, entre as maiores diferenças de módulo simuladas. Esse fato indica que para essa geometria, não há relevância substancial desse parâmetro na deformação final do barramento.

Tabela 4. Valores de deformação obtidas nas análises numéricas – 28º estágio– HQ1.

Hipótese	Módulo de elasticidade (kPa)	Desl. Vertical (cm)	Desl. Horizontal (cm)	Desl. Total (cm)
1	15000	28,6	4,1	28,9
2	20000	27,7	3,8	27,9
3	25000	27,1	3,7	27,4

De maneira geral, os diagramas mostram uma concentração de deformação e deslocamento na região da fundação sob a implantação do barramento (Figura 7). Coerente com o esperado, os resultados indicam maiores valores de deformação para a simulação com o menor módulo de deformabilidade do colúvio. Observa-se também que as regiões com os maiores valores de deformação são àquelas localizadas nos contatos entre materiais com as maiores diferenças entre os módulos de deformabilidade. O comportamento identificado é congruente com o apontado por Aires (2006), que verifica concentrações de tensões em zonas de filtro e transições, esperada pela elevada rigidez perante os materiais adjacentes.

Na Figura 7, é apresentado o resultado do método Shear Strength Reduction (SSR) utilizando elementos finitos. O critério utilizado permite determinar um coeficiente de redução progressiva dos parâmetros de resistência do material até que se atinja o limite de ruptura do talude. O método é baseado no critério de ruptura de Mohr-Coulomb e o resultado gerado é denominado SRF - fator de redução de resistência (Strength Reduction Factor).

Para o cenário de implantação total do projeto, obteve-se SRF igual a 1,66, e fator de segurança (FS) encontrado para a mesma seção considerando análises por equilíbrio limite (FS = 1,63). Na Figura 7, apresenta-se também a superfície de ruptura global mínima encontrada na análise pelo método de equilíbrio limite, representada pela linha vermelha. Nota-se que a região de maior deformação cisalhante, correspondente ao SRF crítico, não é similar a superfície encontrada pelo método de equilíbrio limite. Esse fato advém da concentração de deformação cisalhante na região do HQ1, consequência do baixo módulo de deformabilidade do colúvio (quando comparado com os demais materiais) associado com o carregamento do maciço.

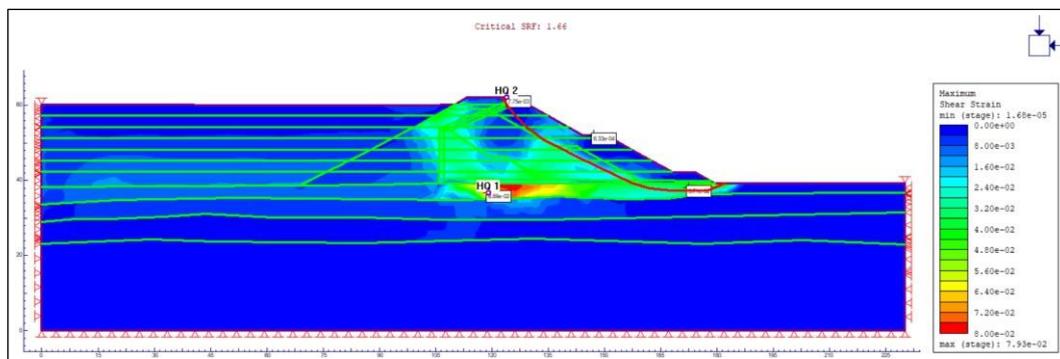


Figura 7. Fator de segurança pelo método Shear Strength Reduction (SRF=1,66) – Condição final do barramento (28ºestágio), Hipótese 1- Máxima deformação cisalhante.

4.2 Análises e definições

O monitoramento de instrumentos possibilita avaliar o desenvolvimento dos deslocamentos associados a implantação, que auxilia no diagnóstico e verificação da aderência da operação ao previsto em projeto, a adequabilidade e validação da técnica construtiva utilizada, além da natureza de um evento adverso específico.

A partir de todo o exposto, foram avaliados os deslocamentos nos modelos numéricos nos cenários e foram sugeridos níveis de controle para deslocamento para as fases de implantação da estrutura e operação. Além disso, em razão da baixa variabilidade de valores de deformação, optou-se por apresentar os níveis de controle apenas para a hipótese 1. Destaca-se que, por se tratar de uma estrutura de contenção de rejeitos as fases de implantação e operação estão sobrepostas.

Como sugestão de níveis de controle, optou-se por definir níveis de normalidade e de alerta, durante a fase de implantação. Dessa maneira, em caso do atingimento de nível, sugere-se planos de ações associados que podem contemplar: visitas à obra, avaliação sobre a acurácia dos equipamentos utilizados no monitoramento, reorganização das atividades de maneira a eventualmente alterar a sequência de disposição.

Nessa etapa de implantação, foi avaliado como ponto monitoramento de controle de deslocamento vertical (recalque) apenas o ponto HQ1 e o nível de controle determinado pelo atingimento de toda a deformação admitida até aquele estágio, conforme o gráfico exposto na Figura 6.

Para avaliação e definição dos níveis de controle dos deslocamentos na etapa pós-implantação, foi utilizado o método de SSR (Shear Strength Reduction). A utilização da metodologia proposta para definir os níveis de controle apresenta como objetivo associar os valores de referência com modelo numérico que possibilita indentificar o mecanismo de ruptura e zona mais provável de colapso.

O modelo hipotético proposto apresenta materiais de fundação com baixa resistência, principalmente quando comparados com os outras litologias existentes no modelo. Nesse sentido, o método de redução de resistência é representativo para as circunstâncias de campo que induzem alterações do comportamento do material associado aos processos de mobilização geral, que resulta na alteração do estado de tensão e resistência do solo.

A simulação do estudo mostra uma taxa de variação crescente dos deslocamentos, a partir do fator de redução de aproximadamente de 1,66 (Figura 8). Para condição do SRF crítico, os deslocamentos verticais na crista e berma são aproximadamente de 0,82 e 0,35 m. respectivamente. Quanto aos deslocamentos horizontais para o mesmo cenário, SRF crítico, os valores atingiram aproximadamente 0,45 e 0,35m.

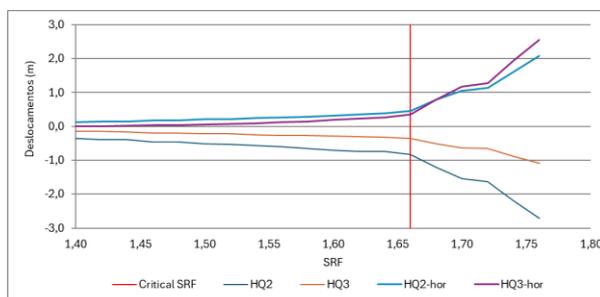


Figura 8 – Desenvolvimento dos deslocamentos verticais e horizontais nas bermas.

Para a definição dos níveis de controle foi verificado o deslocamento correspondente a 50% da deformação total estimada para o SRF crítico (Tabela 5).

Tabela 5. Valores de níveis de controle propostos para a fase de operação.

Nível de controle	HQ2		HQ3	
	Vert. (m)	Hor. (m)	Vert. (m)	Hor. (m)
Atenção	0,41	0,22	0,17	0,17

De modo complementar aos resultados das leituras dos instrumentos, devem ser realizadas inspeções visuais periódicas das estruturas visando identificar eventuais anomalias (trincas, abatimentos e recalques, ocorrência de erosões, aparecimento de surgência ou porções umedecidas, entre outras) que porventura venham a ocorrer.

5 CONCLUSÕES

Na literatura são apresentadas diferentes metodologias para definição de níveis de controle para deslocamentos de barragens, que percorrem por métodos estatísticos, empíricos e numéricos. O presente estudo utilizou de análise numérica para definição dos níveis de controle. Para o modelo numérico, foi realizado o estudo de tensão-deformação em uma seção típica de uma barragem de contenção de rejeito.

Por meio das análises, foi possível identificar a sensibilidade dos parâmetros de deformabilidade dos diferentes materiais no modelo avaliado. A aplicação de análises numéricas na definição dos níveis de controle encontra-se em avanço no estado da arte, e com inúmeras possibilidades de desenvolvimento e espaço para discussão. Por fim, ressalta-se que, a definição de níveis para barragens não deve ser estabelecida unicamente sob a avaliação dos resultados meramente numéricos, faz-se necessária uma avaliação análise interdisciplinar que inclua a avaliação da condição integral da estrutura.

Destaca-se também que o modelo numérico estabelecido para o controle de níveis pode ser calibrado com a leitura dos instrumentos instalados na barragem. A partir de parâmetros de entrada no software mais acurados e modelos mais aderentes, o estabelecimento e o acompanhamento dos níveis de controle proporciona maior segurança durante a implantação e operação da estrutura.

Ainda é uma possibilidade não abordada no presente trabalho, a simulação de cenários diferentes de disposição/operação da estrutura, de maneira a avaliar a possível alteração da dinâmica de movimentação da estrutura. Além disso, também é uma oportunidade a inserção de nível d'água nas análises simuladas.

AGRADECIMENTOS

A Tellus Company, pelo incentivo em pesquisa e inovação, além do suporte técnico, e disponibilização das ferramentas necessárias para o desenvolvimento do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aires, A. D. B (2006). Estudo tensão-deformação da barragem de Irapé. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Brasil. Resolução nº 95, de 07 de fevereiro de 2022. *Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração*. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF.
- Cruz, P.T. (1996). 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. São Paulo: Oficina de Textos.
- Lindquist, L.N. (1983) Instrumentação geotécnica: tipos, desempenho, confiabilidade, eficiência da qualidade e quantidade. In: Simpósio Sobre A Geotecnia Da Bacia Do Alto Paraná, São Paulo.