

## Estudo Conceitual de Rebaixamento do Reservatório de uma Barragem de Mineração para Fins de Descaracterização

Fernando Duarte Azevedo

Engenheiro Geotécnico, Geoestável, Belo Horizonte, Brasil, fernando.azevedo@geoestavel.com.br

Roberto Francisco de Azevedo

Consultor, Geoestável, Belo Horizonte, Brasil, roberto.azevedo@geoestavel.com.br

Rebeca Valentim Marques França

Engenheira Geotécnica, Geoestável, Belo Horizonte, Brasil, rebeca.franca@geoestavel.com.br

**RESUMO:** Projetos de descaracterização de barragens apresentam uma série de questões técnicas que devem ser avaliadas com cautela. Uma dessas questões está relacionada à velocidade de rebaixamento do reservatório de uma barragem de acumulação de água, que pode gerar rupturas do talude de montante. Neste trabalho, estudou-se o rebaixamento do reservatório de uma barragem convencional de mineração, para a etapa conceitual do projeto de descaracterização da estrutura. Por meio de análises transientes de fluxo, utilizando-se o programa de elementos finitos *Rocscience Slide2 2018*, estimou-se o tempo total necessário para se esgotar o reservatório, de forma a atender ao critério de estabilidade da norma NBR 13028, para o talude de montante. A velocidade média encontrada para o completo rebaixamento do reservatório foi considerada aceitável, ficando próxima de valores apresentados na literatura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragem, Rebaixamento Rápido, Análise Transiente, Solos Não Saturados, Elementos Finitos.

**ABSTRACT:** Dam decommissioning projects present a number of technical issues that must be carefully evaluated. One of these issues is related to the lowering speed of the reservoir of a water accumulation dam, which can generate failures of the upstream slope. In the present paper, the reservoir lowering of a conventional mining dam was studied for the conceptual stage of the structure's decommissioning project. Flow transient analysis using the finite element program *Rocscience Slide2 2018* were performed to estimate the total time required to deplete the reservoir, in order to meet the stability criterion of the Brazilian standard NBR 13028 for the upstream slope. The average velocity found for the complete lowering of the reservoir was considered acceptable, being close to values presented in the literature.

**KEYWORDS:** Dam, Rapid Drawdown, Transient Analysis, Unsaturated Soils, Finite Elements.

### 1 Introdução

Após as rupturas das barragens Fundão e B1, em novembro de 2015 e em janeiro de 2019, respectivamente, a demanda pela elaboração e implantação de projetos de descaracterização deste tipo de estrutura geotécnica aumentou consideravelmente, no país. Em fevereiro de 2019, como medida regulatória cautelar, a Agência Nacional de Mineração (ANM) estabeleceu, por meio da Resolução nº 4, prazos para a completa remoção de barragens construídas com rejeitos e que tivessem sido alteadas pelo método denominado “a montante”.

Os prazos estabelecidos inicialmente, entretanto, geraram discussões acerca das condições de segurança de tais obras, uma vez que as próprias intervenções nas estruturas poderiam se tornar gatilhos para novas rupturas em condições não drenadas.

Em barragens convencionais de acumulação de água, construídas com solo compactado, uma das principais preocupações relacionadas à execução de obras de descaracterização é o tempo de rebaixamento do nível de água, que pode acarretar no colapso do talude de montante, também em condições não drenadas.

Neste trabalho, estudou-se o rebaixamento do reservatório de uma barragem convencional de mineração, construída com as finalidades de acumulação de água e contenção de sedimentos, para a etapa conceitual do projeto de descaracterização da estrutura. Por questões de planejamento estratégico da empresa responsável pela operação da barragem, o nome da estrutura e da empresa não são mencionados.

O objetivo principal dos estudos foi o de estimar o tempo necessário para o completo rebaixamento do reservatório, de forma a atender ao critério de estabilidade da norma NBR 13028 (ABNT, 2017), para o talude de montante. O trabalho procurou, ainda, contribuir para uma maior difusão dos conceitos sobre análises de rebaixamento de reservatórios de barragens, dado o restrito número de publicações sobre o assunto, em português.

## 2 Conceitos sobre Rebaixamento de Reservatórios de Barragens Convencionais

O rebaixamento do reservatório de uma barragem convencional, inicialmente em regime de fluxo permanente, é caracterizado como “rápido” (“*rapid drawdown*”) quando realizado a uma velocidade superior à capacidade de dissipação das poropressões existentes no maciço da estrutura. A diminuição do nível de água reduz as tensões totais no talude de montante e resulta em variações das poropressões, cujos valores dependerão do comportamento do esqueleto sólido do material. Estas poropressões não estarão em equilíbrio com a nova condição de contorno (ausência da carga imposta pelo reservatório) e, portanto, inicia-se um regime de fluxo transiente (Alonso e Pinyol, 2009).

Neste ponto, a principal questão que deve ser verificada é se o comportamento dos materiais tende a ser drenado ou não drenado, de forma que parâmetros adequados lhes sejam atribuídos, ao se analisar a estabilidade da estrutura. Caso as permeabilidades sejam altas e as compressibilidades sejam baixas, os excessos de poropressão gerados serão rapidamente dissipados, e o comportamento será essencialmente drenado. Caso contrário, os excessos de poropressão gerados não serão rapidamente dissipados, o comportamento será praticamente não drenado, e a consequência pode ser a ruptura do talude de montante, já que, com o reservatório vazio, o talude (saturado) não conta mais com a força estabilizante do peso da água.

Segundo Pinyol et al. (2008), os métodos aproximados de análise de rebaixamento são classificados em dois grupos: (1) métodos de fluxo (“*flow approach*” ou “*flow methods*”), para materiais rígidos e permeáveis (tipicamente materiais granulares); e (2) métodos não drenados (“*stress-based undrained approach*” ou “*undrained methods*”), para materiais impermeáveis. Entretanto, as condições encontradas em campo frequentemente não atendem a nenhum dos grupos, uma vez que envolvem materiais com diferentes permeabilidades e compressibilidades, e com arranjos geométricos complexos. Os métodos de fluxo assumem que o esqueleto sólido dos solos é rígido (incompressível) e que nenhuma variação de poropressões no maciço é causada pela variação de tensões totais (originadas pelo rebaixamento). Essa hipótese, entretanto, é contestada pelo fato de que seria necessário que a rigidez do esqueleto sólido do solo fosse muito maior que a rigidez da água. Os métodos não drenados consideram a variação de poropressões induzida unicamente pela variação de tensões totais causada por um rebaixamento instantâneo do reservatório.

Pinyol et al. (2008) realizou análises de rebaixamento rápido por meio de quatro procedimentos, comparando os resultados obtidos com as poropressões fornecidas por instrumentos instalados no campo, e concluiu que os melhores resultados vieram de análises nas quais se considerou o acoplamento entre fluxo e tensão-deformação (modelo hidromecânico).

O estudo apresentado neste artigo somente considera análises de fluxo, cujo enfoque pode ser considerado adequado para projetos conceituais, principalmente quando se deseja avaliar a “ordem de grandeza” do tempo de rebaixamento.

## 3 Metodologia de Análise

### 3.1 Caracterização da Barragem

O projeto de “*As Is*” da barragem estudada, elaborado entre os anos de 2018 e 2019, foi utilizado para a obtenção de alguns dos dados necessários, como geometria, dados de instrumentação, condições de contorno, parâmetros de resistência ao cisalhamento e condutividades hidráulicas. Como será visto, entretanto, alguns

parâmetros específicos foram mantidos conforme o banco de dados do *Slide2 2018*, dada a ausência de ensaios necessários para sua determinação.

### 3.1.1 Geometria e Instrumentação

A estrutura foi construída incorporando-se a ensecadeira de montante, implantada na elevação 282 m. Atualmente, a barragem encontra-se coroada na elevação 320 m, com altura máxima de 46 m, e largura e comprimento de crista iguais a 7 m e 370 m, respectivamente. O talude de montante possui inclinação média entre bermas de 1,0V:2,0H, com berma de 5 m na elevação 282 m, e o talude de jusante apresenta inclinações médias entre bermas de 1,0V:2,0H, com bermas de aproximadamente 3 m nas elevações 310 m, 300 m e 290 m. O nível máximo de água do reservatório fica na elevação 316 m, e os sedimentos carreados, segundo levantamentos topobatimétricos realizados em 2019, estão depositados na elevação 292 m.

Analisou-se o rebaixamento do reservatório por meio da seção transversal B-B', que representa a máxima altura da barragem, cuja geometria é apresentada na Figura 1. Nesta mesma figura, apresenta-se a instrumentação geotécnica instalada (10 piezômetros de tubo aberto), cujas leituras foram utilizadas para aferir a posição da linha freática. A profundidade máxima de rebaixamento do reservatório considerada foi de 24 metros, entre as elevações 316 m (nível d'água) e 292 m (topo dos sedimentos). A jusante, o nível de água foi considerado na elevação 278 m, conforme histórico de leituras do instrumento PZF111.

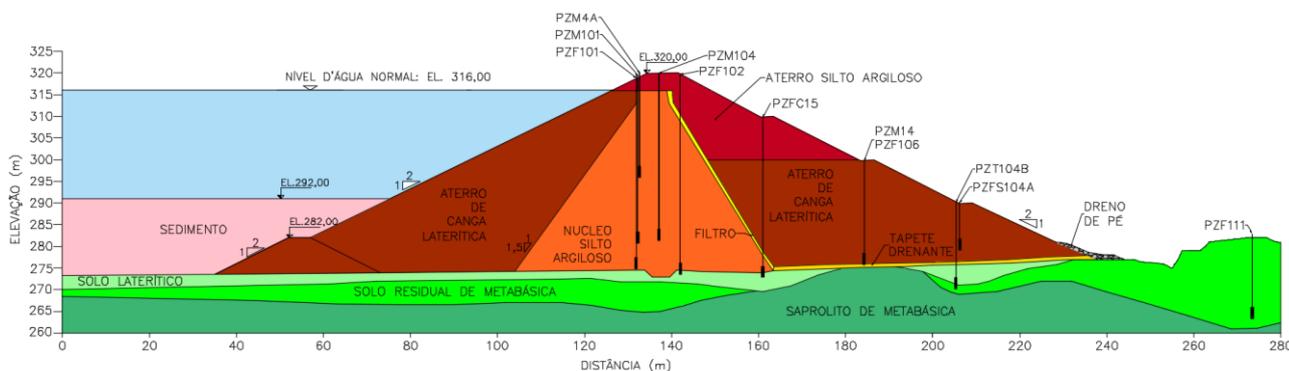


Figura 1. Seção transversal instrumentada B-B'.

### 3.1.2 Materiais Geotécnicos

Como apresentado na Figura 1, o corpo do aterro é zoneado, formado por camadas de solo laterítico de minério de ferro, compactado nos espaldares de montante e jusante (“aterro de canga laterítica”), e núcleo silto-argilo-arenoso a argilo-silto-arenoso, compactado na porção central do barramento, sobre o *cut-off*. No talude de jusante e na crista, acima da elevação 300 m, foi utilizado aterro silto-argiloso, similar ao núcleo, porém com presença de pedregulhos.

Os materiais utilizados na construção do maciço contêm quantidades significativas de pedregulho ( $\phi > 2,00\text{mm}$ ), contudo as amostras utilizadas no núcleo contêm quantidades de solos finos superiores a 50%, que condicionam o comportamento desta parte da barragem. As amostras coletadas na região do aterro de canga laterítica indicaram o oposto, com maiores porcentagens de pedregulho e comportamento geotécnico ditado por esta fração.

Resultados de ensaios SPT indicaram que o aterro do barramento apresentou consistências bastante heterogêneas, caracterizadas por intervalo de golpes variando de 7 a 53. Todavia, aproximadamente 82% dos resultados apontaram para solos de consistência rija (SPT entre 11 a 19 golpes) a muito rija (SPT entre 19 e 30 golpes).

Ensaio de campo e de laboratório, realizados nos materiais da barragem, conduziram aos parâmetros de resistência e permeabilidade apresentados na Tabela 1, os quais foram utilizados nas análises.

Tabela 1. Parâmetros de resistência e permeabilidade adotados para os materiais.

Material	Cor	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	k (m/s)
Núcleo silto argiloso		21	18	26	$5 \times 10^{-9}$
Aterro de canga laterítica		22	10	30	$1 \times 10^{-6}$
Aterro silto argiloso		22	10	30	$1 \times 10^{-8}$
Filtro inclinado		19	0	32	$1 \times 10^{-4}$
Tapete drenante		21	0	32	$2 \times 10^{-5}$
Dreno de pé		21	0	32	$1 \times 10^{-3}$
Solo laterítico		18	20	30	$1 \times 10^{-6}$
Solo residual de metabásica		22	20	27	$5 \times 10^{-7}$
Saprolito de metabásica		23	30	30	$5 \times 10^{-7}$
Sedimentos		19	0	15	$1 \times 10^{-6}$

### 3.2 Estudos de Rebaixamento do Reservatório da Barragem

Após as etapas iniciais de (1) caracterização da barragem e da seção B-B', (2) definição das condições de contorno do problema, e (3) adoção dos parâmetros de resistência e permeabilidade dos materiais, procedeu-se à elaboração dos estudos de rebaixamento do reservatório.

Por meio de análises transientes de fluxo, utilizando-se o programa de elementos finitos *Slide2 2018*, da empresa *Rocscience*, estimou-se o tempo total necessário para se esgotar o reservatório, de forma a atender ao fator de segurança mínimo (igual a 1,10), da norma NBR 13028 (ABNT, 2017), para a estabilidade do talude de montante, exigido em casos de rebaixamento rápido.

Em síntese, o procedimento foi elaborado em duas etapas, listadas abaixo e detalhadas na sequência (itens 3.2.1 e 3.2.2):

- a) Análise de percolação em regime permanente, para aferir a posição inicial da linha freática;
- b) Análise de rebaixamento transiente, subdividida em 6 estágios, para avaliar a evolução da posição da linha freática, ao longo do rebaixamento.

A estabilidade do talude de montante foi avaliada tanto na análise de percolação em regime permanente, quanto na análise de rebaixamento transiente (em todos os estágios).

As demais condições gerais adotadas, relativas ao programa *Slide2 2018*, foram:

- I. Malha com elementos triangulares de 6 nós, com aproximadamente 6000 elementos, no total;
- II. Aba “Groundwater” de “Project Settings”:
  - a. “Method”: “Steady State FEA”;
  - b. “Advanced”: “Transient Groundwater”;
- III. Aba “Transient” de “Project Settings”:
  - a. Estágio 1: 15 dias;
  - b. Estágio 2: 40 dias;
  - c. Estágio 3: 80 dias;
  - d. Estágio 4: 130 dias;
  - e. Estágio 5: 190 dias;
  - f. Estágio 6: 240 dias;
- IV. Método de equilíbrio limite de Spencer (1967);
- V. Superfície circular, “grid search”.

#### 3.2.1 Análise de Percolação em Regime Permanente (Condição Inicial)

Inicialmente, elaborou-se uma análise de percolação, considerando-se regime de fluxo permanente, para aferição das condições de estabilidade do talude de montante da barragem, e das condutividades hidráulicas

dos materiais, de acordo com as leituras dos instrumentos instalados próximos à seção B-B' (Figura 1). A Figura 2 apresenta o resultado obtido, com fator de segurança (FS) igual a 1,70. Também são indicadas as cargas totais (“*Total Head*”), ao longo da seção.

Observa-se, no núcleo da barragem, que as leituras médias da instrumentação (marcadas com pequenos traços horizontais), estão em elevações mais baixas que a posição da linha freática. No entanto, esta diferença não influenciou os resultados de estabilidade porque, como se verá adiante, o rebaixamento do nível de água no talude de montante pouco modificou o nível de água dentro do núcleo, e as diversas superfícies críticas passaram, sobretudo, pelo espaldar de montante (aterro de canga laterítica).

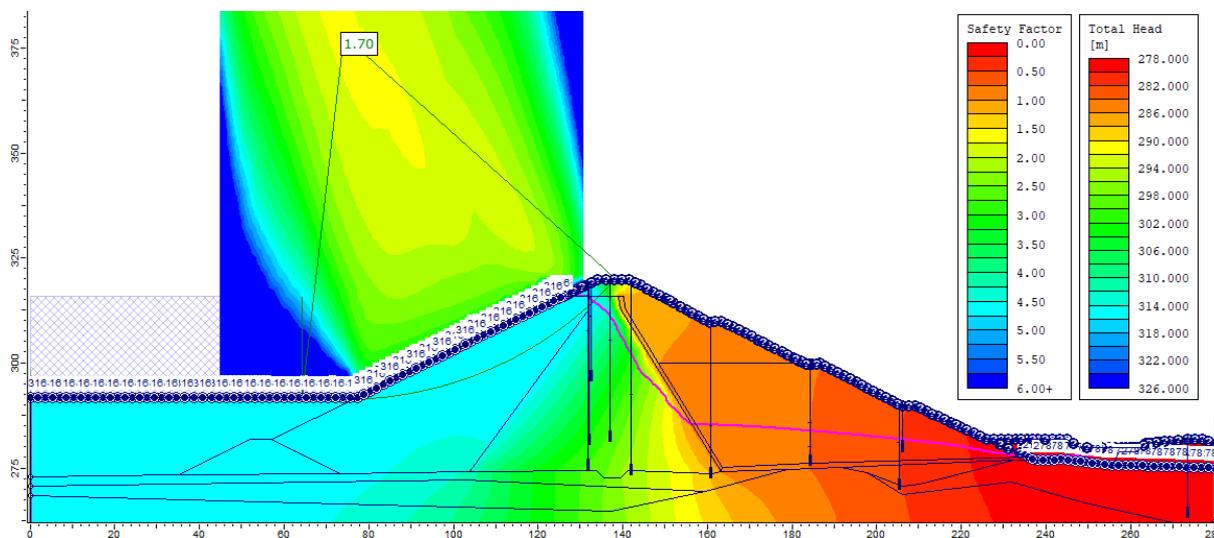


Figura 2. Análises de estabilidade e de percolação do talude de montante, em regime permanente.

### 3.2.2 Análise de Rebaixamento Transiente

Em seguida, foram estudados os estágios necessários para o rebaixamento do reservatório, tendo em vista que um rebaixamento instantâneo levaria o talude de montante ao colapso, uma vez que o fator de segurança obtido para esta condição (não apresentada neste artigo) foi igual a 0,87.

Em um rebaixamento transiente, a saturação do talude de montante diminui ao longo do tempo, em função de suas propriedades hidráulicas (curva de retenção de umidade e curva de variação da condutividade hidráulica com a sucção ou umidade). Portanto, a rigor, em uma análise de rebaixamento, estas propriedades do solo devem ser conhecidas para a modelagem adequada do problema.

No entanto, na ausência dessas (e outras) informações no projeto de “*As Is*” da barragem, foram adotados os valores presentes no programa *Slide2 2018*, relativos às propriedades hidráulicas dos materiais. Essas e as demais condições adotadas, foram:

- I. 6 estágios, seguindo-se os estágios 1 a 6, apresentados no item 3.2, com cargas totais (nível do reservatório) iguais a, respectivamente, 312 m, 308 m, 304 m, 300 m, 296 m e 292 m;
- II. “*Model*”: “*Simple*”, para todos os materiais;
- III. “*Simple Parameters*”: “*Clay*”, para o núcleo argiloso; “*Sand*”, para o aterro de canga laterítica; e “*General*”, para os demais materiais;
- IV.  $K2/K1$  (relação entre permeabilidades ortogonais) igual a 1, para todos os materiais;
- V. Teores de umidade saturado (“*WC sat*”) e residual (“*WC res*”) iguais a 40% e 5%, respectivamente, e coeficiente de compressibilidade ( $m_v$ ) igual a  $2 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$ , para todos os materiais.

As figuras a seguir (Figura 3 a Figura 8) apresentam os resultados. Observa-se que, em todos os estágios, foram obtidos fatores de segurança superiores a 1,10. Ademais, percebe-se que a elevação da linha freática diminui mais rapidamente no espaldar de montante (aterro de canga laterítica), que no núcleo da barragem, uma vez a permeabilidade do talude de montante é maior que neste último e, portanto, os excessos de poropressão existentes são mais rapidamente dissipados.

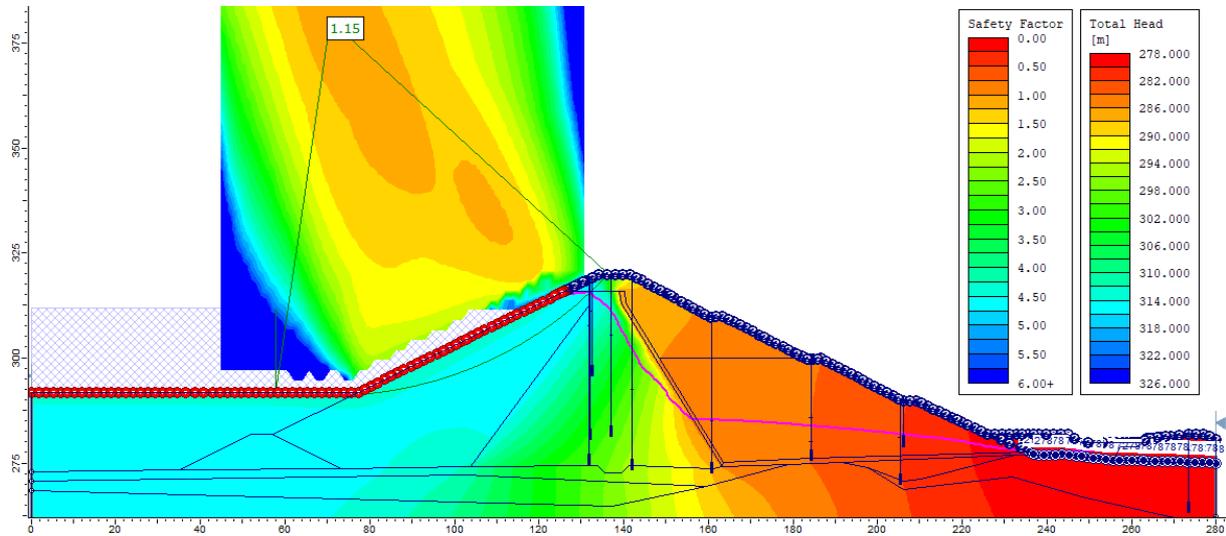


Figura 3. Rebaixamento entre as elevações 316 m e 312 m – tempo total transcorrido: 15 dias.

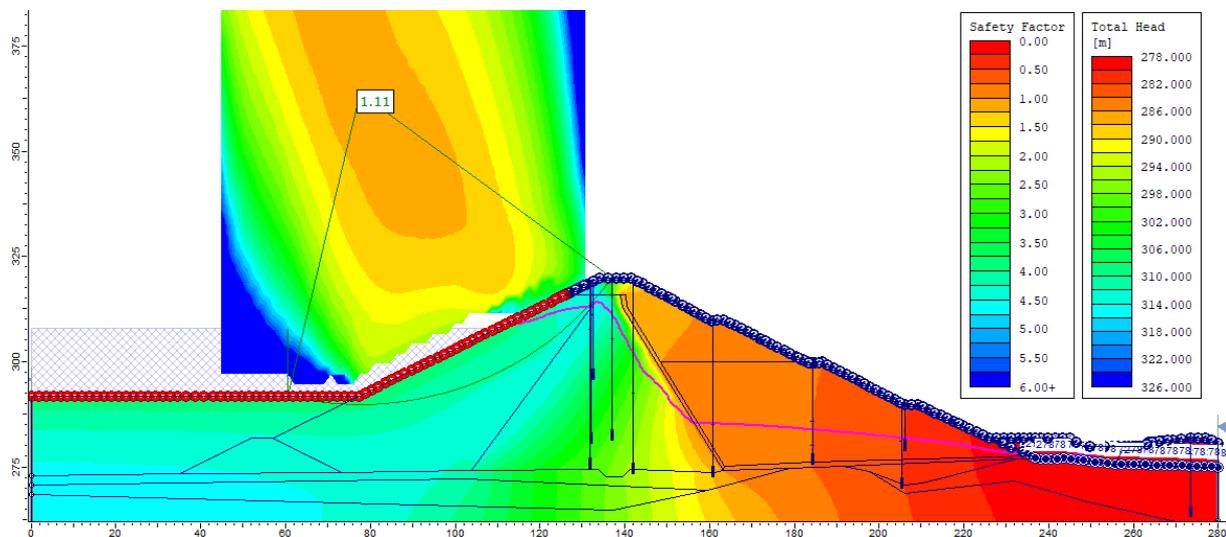


Figura 4. Rebaixamento entre as elevações 312 m e 308 m – tempo total transcorrido: 40 dias.

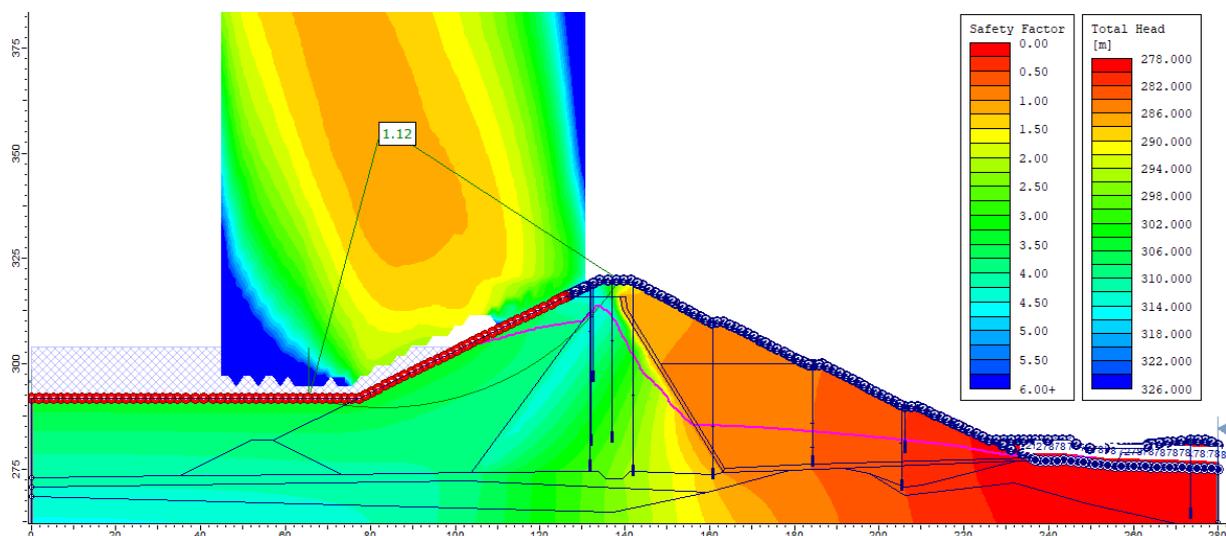


Figura 5. Rebaixamento entre as elevações 308 m e 304 m – tempo total transcorrido: 80 dias.

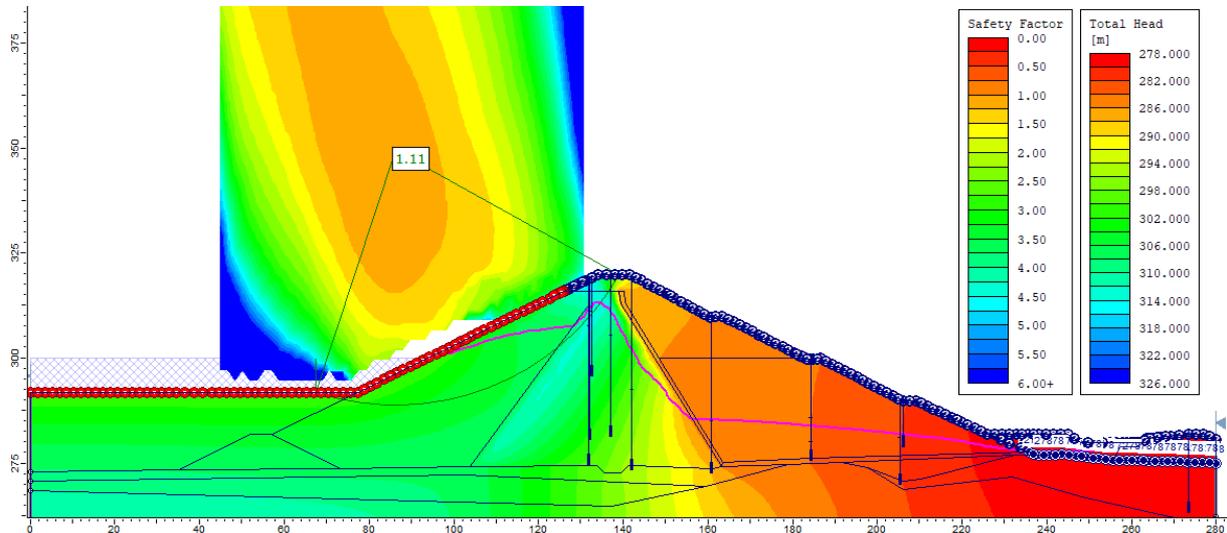


Figura 6. Rebaixamento entre as elevações 304 m e 300 m – tempo total transcorrido: 130 dias.

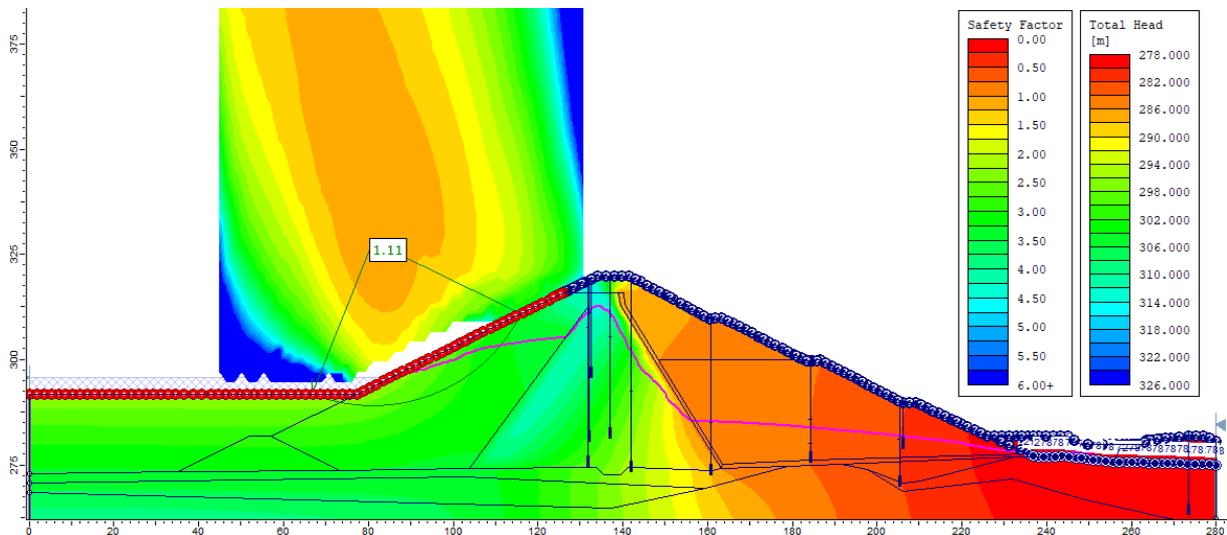


Figura 7. Rebaixamento entre as elevações 300 m e 296 m – tempo total transcorrido: 190 dias.

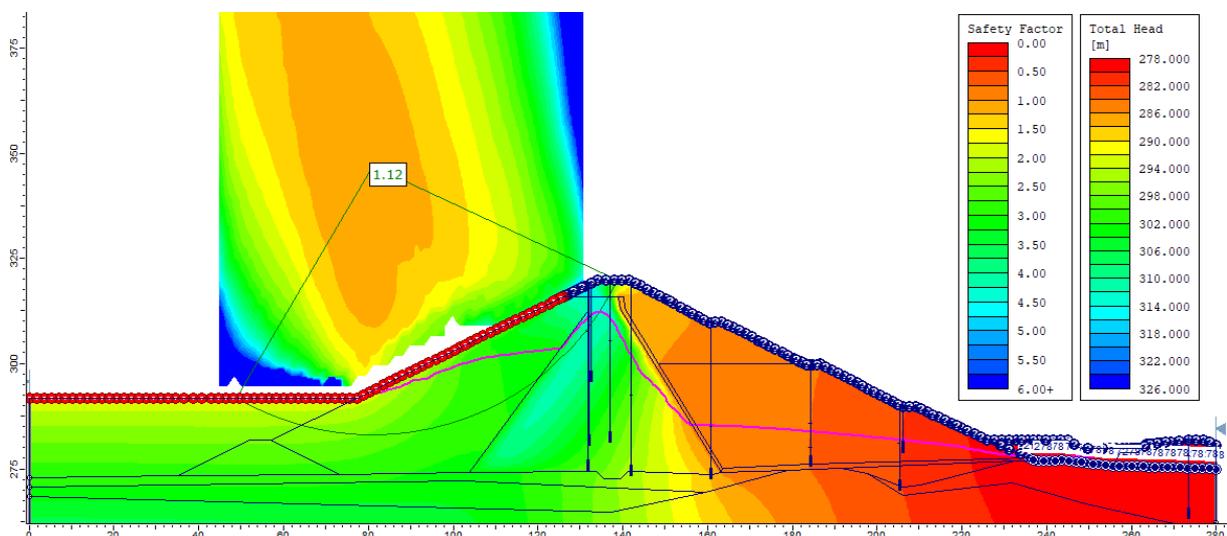


Figura 8. Rebaixamento entre as elevações 296 m e 292 m – tempo total transcorrido: 240 dias.

#### 4 Comentários Finais

O tempo total encontrado para o rebaixamento transiente foi de 240 dias, perfazendo uma velocidade média de rebaixamento de 10 centímetros por dia (24 m em 240 dias). Esta velocidade foi considerada aceitável, uma vez que ficou próxima de valores apresentados na literatura (Tabela 2).

Tabela 2. Velocidades típicas de rebaixamento de reservatórios de barragens.

Referência	Velocidade(s) em metros por dia (m/d)
Sherard (1953) <i>apud</i> Sandroni (2012)	0,09 a 0,15
BRE (1999) <i>apud</i> Courtnadge et al. (2017)	0,30
Pinyol et al. (2008)	0,10 (comum) a 1,00 (excepcional)
Stark & Jafari (2017)	0,42 e 0,45

O número de estágios (seis) adotado foi determinado após a realização de diversas análises, variando-se as elevações do reservatório e as durações de cada estágio, para atendimento dos fatores de segurança.

Cabe ressaltar, novamente, que os estudos foram realizados de forma conceitual, com modelos simplificados e alguns dados inferidos. Como forma de calibrar o modelo adotado, sugeriu-se a aferição dos parâmetros utilizados, por meio da determinação da curva característica dos materiais, em laboratório, e a instalação de novos instrumentos de monitoramento do nível de água, no talude de montante.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Geoestável e ao Cobramseg 2020 pela oportunidade de divulgação do trabalho.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E.; Pinyol, N. (2009) – *Slope stability under rapid drawdown conditions*. First Italian Workshop on Landslides.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017) – NBR 13028 – Mineração – *Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos*.
- Building Research Establishment (1999) – *An engineering guide to the safety of embankment dams in the UK*. BRE 363, second edition, Construction Research Communications Ltd.
- Courtnadge, A.; Gosden, J.; Brown, A. (2017) – *Guide to drawdown capacity for reservoir safety and emergency planning*. Flood and Coastal Erosion Risk Management Research and Development Programme. Volume 1.
- Pinyol, N. M.; Alonso, E. E.; Olivella, S. (2008) – *Rapid drawdown in slopes and embankments*. Water Resources Research, Vol. 44.
- Sandroni, S. S. (2012) Barragens, Notas de aula, Curso de Mestrado em Engenharia Civil: Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.
- Sherard, J. L. (1953) – *Influence of soil properties and construction methods on the performance of homogeneous earth dams*. Denver, Colorado. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division.
- Spencer, E. (1967) – A Method of Analysis of The Stability of Embankments Assuming Parallel Interslice Forces. *Géotechnique*. 17: 11-26.
- Stark, T. D.; Jafari, N. H. (2017) – *Rapid drawdown stability Analysis of San Luis Dam*. 3<sup>rd</sup> North American Symposium on Landslides. Roanoke, Virginia.