

# Análises de Percolação em Regime Transiente e Estabilidade Para Otimização do Reforço de Barragens: um Estudo de Caso

Renata Pereira Gomes

Eng<sup>a</sup> Civil Geotécnica, DAM Projetos de Engenharia, Belo Horizonte/MG, Brasil, renatapgomes97@gmail.com

Rafael Mendonça Carvalhais

Eng<sup>o</sup> Civil Geotécnico, DAM Projetos de Engenharia, Belo Horizonte/MG, Brasil, rmcavalhais@gmail.com

Frank Marcos da Silva Pereira

Eng<sup>o</sup> Civil Geotécnico, VALE, Belo Horizonte/MG, Brasil, frank.pereira@vale.com

Daliana Cristina Possari

Eng<sup>a</sup> Civil Geotécnica, VALE, Belo Horizonte/MG, Brasil, daliana.possari@vale.com

Sofia Martins Torres

Eng<sup>a</sup> Civil Geotécnica, DAM Projetos de Engenharia, Belo Horizonte/MG, Brasil, sofiatorres1888@gmail.com

**RESUMO:** A barragem que alvo de estudo foi implantada com objetivo de conter sedimentos de pilhas existentes a montante e de armazenar água. O maciço principal da estrutura é composto por um núcleo argiloso, e trechos de montante e jusante em aterro silto argiloso. O reforço da barragem foi executado em solo coluvionar argiloso até a El.657,00 m, e em solo coluvionar até a El.666,60m. Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo de caso de otimização de reforço em barragens, em que foram analisadas a estabilidade e percolação em regime de fluxo transiente da estrutura, avaliando a possibilidade de surgências no talude de jusante, a permanência do nível d'água no máximo maximorum no período do evento de precipitação máxima provável (18 horas) e considerando em um período chuvoso completo (aproximadamente seis meses). Com base no estudo de caso realizado, foi possível concluir a otimização do reforço na El. 657,00 m, uma vez que os cenários críticos hipotéticos são improváveis de serem atingidos. Deve-se avaliar a relação entre os riscos relativos à paralização do reforço na El. 657,00 m e o investimento da execução do reforço até a crista.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragens, Análises Transientes, Percolação, Estabilidade, Fluxo.

**ABSTRACT:** The Dam that was the subject of this study was implemented with the aim of containing sediments from existing piles upstream and storing water. The main mass of the structure is composed of a clayey core, and upstream and downstream sections of clayey silt embankment. Dam buttress was performed using clay colluvium soil up to El. 657.00 m and was performed from that elevation up to approximately El. 666.60m with colluvium soil only. This article aims at presenting an engineered buttress final elevation optimizing study, in which the stability and percolation of the structure in a transient flow regime were analyzed, evaluating the possibility of surges on the downstream slope, considering water level staying at maximum maximorum level in the probable maximum precipitation event timeframe (18 hours), and considering a full rainy season (approximately 6 months). Based on the case study carried out, it was possible to conclude the optimization of the reinforcement at El. 657.00 m, since the hypothetical critical scenarios are unlikely to be reached. The ratio between risks of buttress suspension at El. 657.00 m and buttress performance up to crest investment must be assessed.

**KEYWORDS:** Dams, Transient Analysis, Percolation, Stability, Flow.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo CBDB, as barragens tem a capacidade de reter água, sedimentos e rejeitos, com o objetivo de armazenamento ou controle, podendo ser construídas em maciços de terra, em estruturas de concreto, ou aterro. As barragens construídas para armazenar e controlar água se destinam normalmente para abastecimento doméstico e industrial, à irrigação, à recreação, ao controle de sedimentação e de cheias, e à produção de energia elétrica.

Os acidentes envolvendo barragens por diversas causas demonstram que os barramentos não estão sendo bem planejados, projetados, construídos e/ou mantidos. Diante disso, é necessário que sejam realizados estudos na fase de projeto, com o objetivo de prever e evitar problemas nas estruturas tanto na sua construção, como na sua operação. (SOUZA, 2016).
















Neste artigo, foi avaliado a execução de um aterro de reforço em solo compactado, até a El. 657,00 m, aproximadamente 10,0 m abaixo da elevação da crista de uma barragem de terra. A avaliação foi feita por meio de análises de fluxo em regime transiente, que simulam o comportamento do rebaixamento e da elevação da superfície freática no corpo da barragem em função do tempo, uma vez que, como a permeabilidade dos solos compactados dos aterros das estruturas do barramento são baixas, a elevação e rebaixamento da freática não seguem o nível de rebaixamento e elevação do nível do lago.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Parâmetros de Resistência dos Materiais

A Tabela 1 apresenta o resumo dos parâmetros geotécnicos adotados nas análises de percolação e estabilidade.

Tabela 1 - Parâmetros Geotécnicos dos Materiais

Material	Cor	Parâmetros Geotécnicos						
		$\gamma_{nat}$ (kN/m)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	Permeabilidade K — (m/s)	Kv/Kh
Colúvio		17,0	10,0	27,0	-	-	$10^{-6}$	1
Solo Residual		18,0	23,0	30,0	-	-	$10^{-6}$	1
Saprólito de Gnaiss		18,0	15,0	37,0	-	-	$10^{-5}$	1
Rocha Alterada		23,0	30,0	40,0	-	-	$10^{-5}$	1
Granito de Gnaiss São		23,0	80,0	50,0	-	-	$10^{-5}$	1
Aterro – Maciço Inicial		20,1	12,0	30,0	16,0	25,0	$8 \times 10^{-9}$	0,1
Aterro de Alçamento		18,4	11,9	20,5	16,4	8,9	$8 \times 10^{-9}$	0,1
Reforço Silto Argiloso		19,0	24,3	29,3	58,4	13,5	$6,2 \times 10^{-9}$	0,1
Reforço Argiloso		18,6	29,5	30,2	42,6	17,6	$6,2 \times 10^{-9}$	0,1
Areia		18,0	0,0	33,0	-	-	$4,74 \times 10^{-4}$	1
Brita 1		18,0	0,0	37,0	-	-	$4 \times 10^{-1}$	1
Brita 2		20,0	0,0	37,0	-	-	$10^0$	1
Brita 4		20,0	0	38,0	-	-	$10^0$	1
Enrocamento		21,0	0	40,0	-	-	$9 \times 10^0$	1
Sedimento		17,0	-	-	0,0	12,0	$10^{-4}$	1

Notas:

Com relação ao colúvio, solo Residual e saprólito de Gnaiss presentes na fundação, os parâmetros geotécnicos foram definidos com base em correlações empíricas com NSPT.

Os parâmetros geotécnicos da rocha alterada e granito-gnaiss foram definidos com base na literatura técnica.

Para os materiais a serem utilizados nos sistemas de drenagem interna da barragem, foram interpretados os resultados dos ensaios para areias e pedreiras comerciais na região da obra.

Os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb dos materiais do maciço principal, do alteamento e do reforço foram definidos com base nos ensaios geotécnicos de laboratório.

## 2.2 Método de Cálculo

As análises de estabilidade ao escorregamento foram realizadas considerando as condições de equilíbrio limite, utilizando os métodos de Morgenstern-Price, Bishop Simplified e Spencer, através do programa de computador SLIDE, desenvolvido pela Rocscience Inc., em Toronto, Ontario, Canadá. Esse método satisfaz as condições de equilíbrio de forças e de momentos e admite que as forças entre as lamelas têm a mesma direção.

As análises de percolação também foram realizadas utilizando o programa computacional SLIDE. O programa é utilizado para modelar o fluxo de água e a distribuição de pressões neutras em meios porosos como o solo, através do método dos elementos finitos.

As análises drenadas foram realizadas em termos de tensões efetivas, enquanto as análises pseudo-estáticas foram realizadas em termos de tensões totais abaixo do nível d'água, considerando as condições não drenadas de carregamento, conforme estabelecido pela NBR 13028/2017.

Para as condições drenadas foram considerados fator de segurança mínimo de 1,50, e para as análises pseudo-estáticas foram considerados fator de segurança mínimo de 1,10, conforme estabelecido pela NBR 13028/2017.

## 2.3 Seção Geotécnica Avaliada

As Figuras 1 e 2 apresentam respectivamente a planta de locação da seção analisada com a indicação em laranja da seção crítica – seção BB.

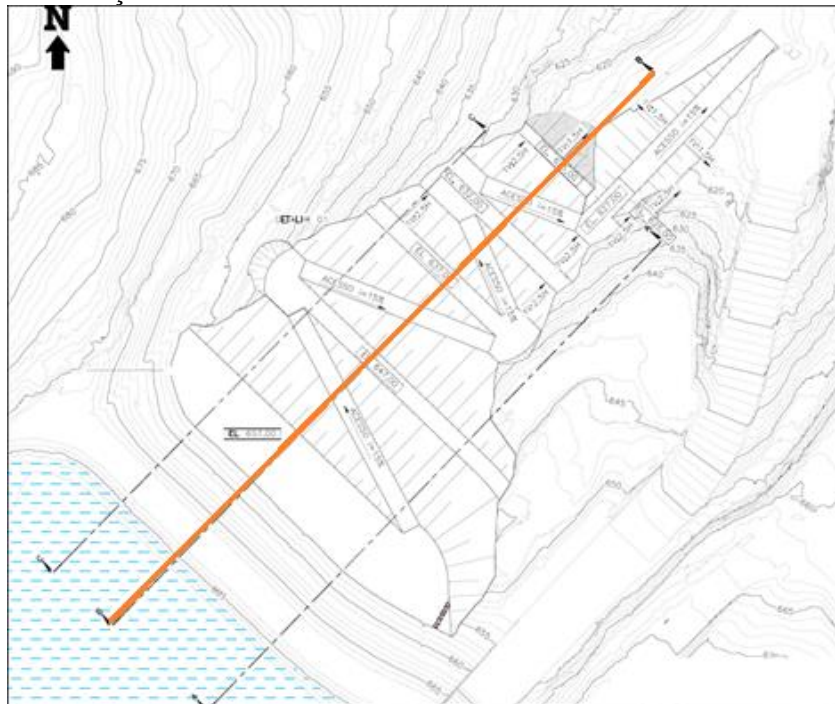


Figura 1. Indicação das seções transversais de análise com as obras de reforço - Planta

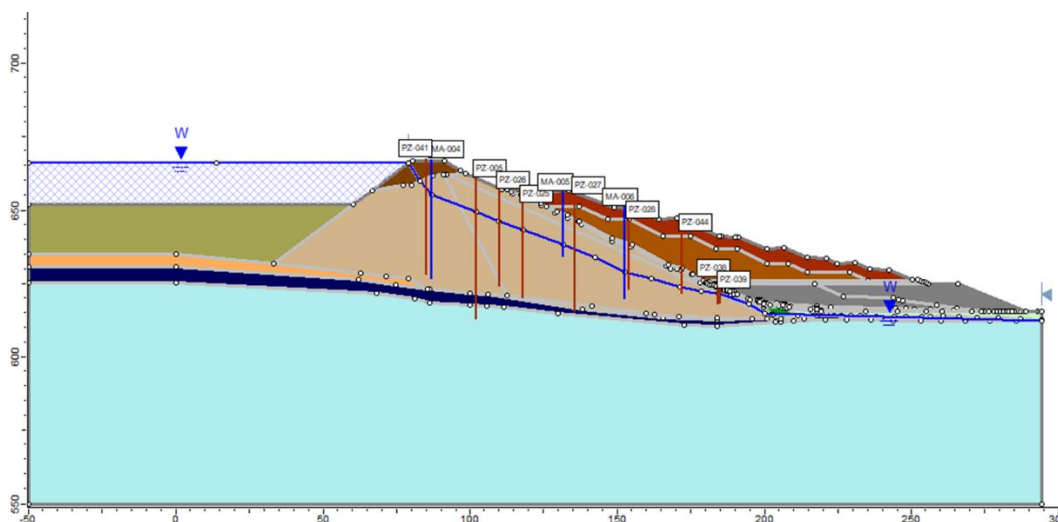


Figura 2. Geometria de Fluxo – Seção BB'

## 2.4 Condições de Contorno

Análises de percolação transientes foram realizadas para a estimativa do tempo de permanência das seções em condições críticas - com níveis d'água mais elevados - em caso de chuvas intensas. As análises foram realizadas com auxílio do software SLIDE da Rocscience, na configuração com o reforço até El. 657,00 m.

Para essas análises, foi considerado inoperante o sistema de drenagem interno existente no maciço, e considerado apenas o funcionamento do novo sistema de drenagem interna projetado, a ser executado entre o maciço existente e o maciço de reforço.

Foram estabelecidas as seguintes condições de contorno: (i) Limitação do valor de sucção no maciço a 5 kPa; (ii) Modelo hidráulico simples; (iii) Malha triangular com número aproximado de 1500 elementos, com discretização melhorada no talude de jusante; (iv) Extremidades laterais e inferiores com condição de contorno nulas; (v) Carga piezométrica no lago de 666,0 m (máximo *maximorum*) constante durante as análises transientes para saturação do maciço; (vi) Condição de contorno no filtro tipo *seepage/unknown* ( $P=0$  ou  $Q=0$ ), considerando a percolação livre no filtro; (vii) Condição do tipo *seepage/unknown* ( $P=0$  ou  $Q=0$ ) na freática limite após o filtro.

## 2.5 Condições de Carregamento

A estabilidade da barragem foi verificada para as condições de carregamento drenado e para a condição de carregamento não drenado com sismo, para a situação final de construção com aterro de reforço na elevação 657,00 m.

Para as análises de estabilidade com sismo, o efeito sísmico foi considerado por meio da aplicação de uma força estática adicional no centro de gravidade da massa deslizante. A força adicional é calculada com base na aceleração induzida pelo sismo. Este carregamento será de 0,10 g na horizontal, corresponde a uma intensidade VII na escala Mercalli Modificada ou magnitude equivalente a 6.0 na escala Richter. Este valor foi definido utilizado  $\frac{1}{2}$  PGA, variando entre 0,15 e 0,2 g, de acordo com recomendação de Griffin e Franklin, julho, 1984. Na direção vertical foi adotado um carregamento de 0,07 g.

## 2.6 Cenários Avaliados

De forma a representar o comportamento da estrutura, foram avaliados os seguintes cenários (i) verificação do comportamento da superfície freática e das condições de estabilidade da estrutura considerando a permanência do nível d'água no máximo *maximorum* no período do evento de precipitação máxima provável (18 horas) e (ii) verificação do comportamento da superfície freática e das condições de estabilidade da estrutura considerando a permanência do nível d'água no máximo *maximorum* em um período chuvoso completo (aproximadamente seis meses).

### 3 RESULTADOS

Neste item apresentam-se os resultados das análises de percolação em regime transiente e das esatbilidades realizadas para a barragem, considerando o reforço em solo compactado até a El. 657,00 m. Será apresentado neste artigo apenas os resultado para a seção crítica – seção BB. As Figuras 3 a 6 apresentam os resultados para os cenários avaliados.

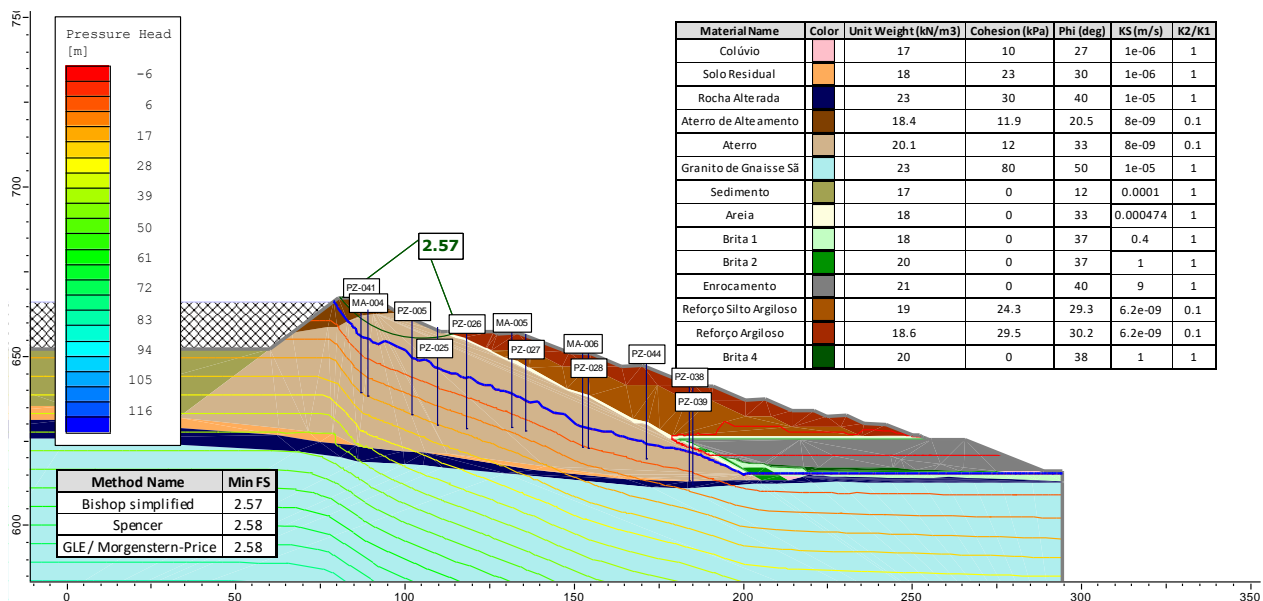


Figura 3. Seção BB' – Cenário (i) Reforço da Barragem até a Elevação 657,00m– Análise Drenada em Precipitação Máxima de Projeto (NA El.666,00 m - 18 horas) – Ruptura Circular

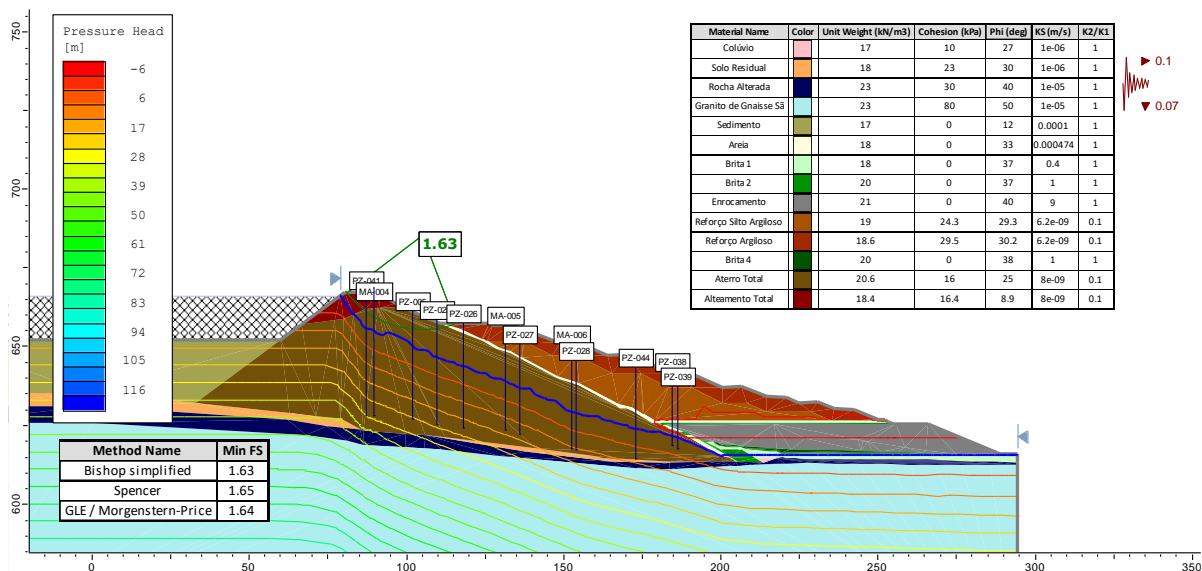


Figura 4. Seção BB' - Cenário (i) Reforço da Barragem até a Elevação 657,00m– Análise Não Drenada com Sismo em Precipitação Máxima de Projeto (NA El.666,00 m - 18 horas) – Ruptura Circular



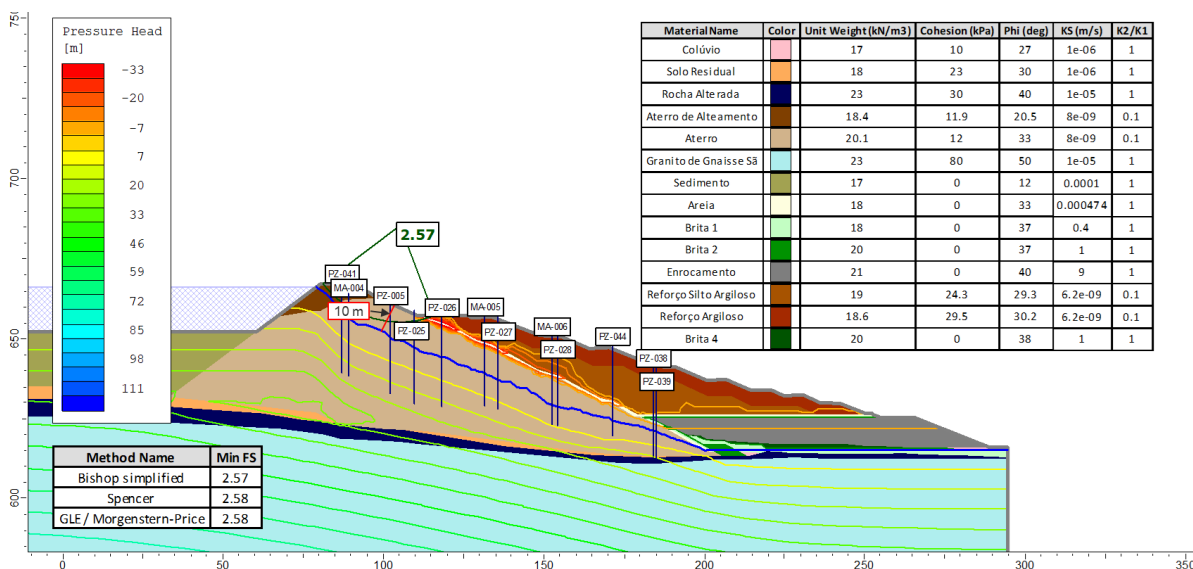


Figura 5. Seção BB' - Cenário (ii) Reforço da Barragem até a Elevação 657,00m– Análise Drenada em Período Chuvoso Completo (NA El.666,0m -180 dias) – Ruptura Circular

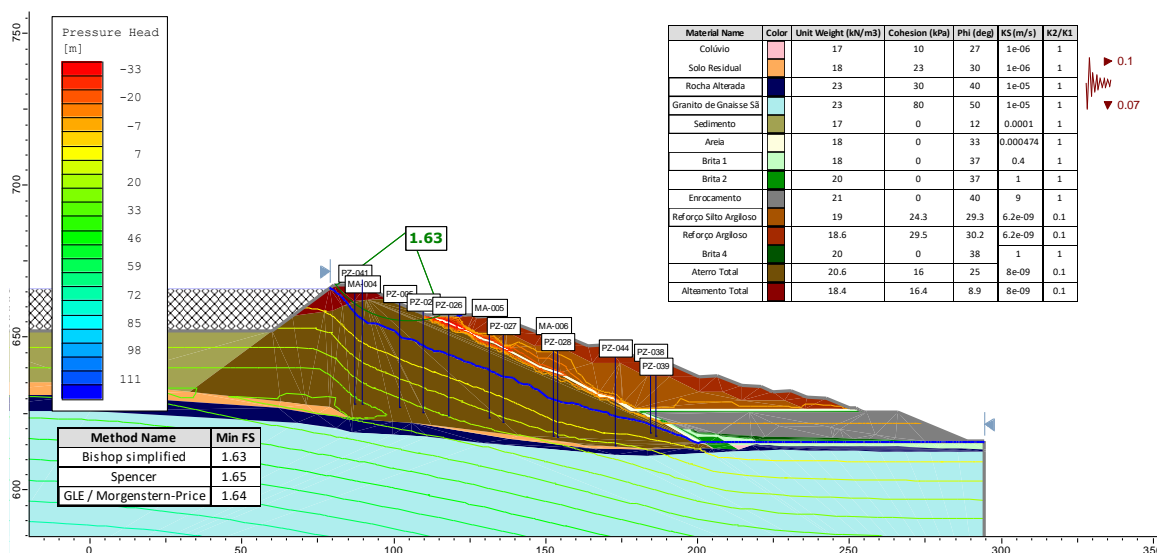


Figura 6. Seção BB' - Cenário (ii) Reforço da Barragem até a Elevação 657,00m– Análise Não Drenada com Sismo em Período Chuvoso Completo (NA El.666,0m -180 dias) – Ruptura Circular

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para as condições gerais estudadas, considerando os parâmetros de resistência obtidos, as análises de percolação em regime transiente e as análises de estabilidade mostram que com a permanência do nível d'água máximo *maximorum* durante a precipitação máxima de projeto, assim como durante um período chuvoso completo (6 meses) - a superfície freática obtida não possui elevação o suficiente para provocar surgências no talude de jusante acima da El. 657,00 m.

Para as condições de carregamento drenada e não drenada com sismo, com reforço até a El. 657,00 m, possuem fatores de segurança superiores aos mínimos preconizados pela NBR 13028/ 2017.

Com base nos estudos avaliados, é possível a otimização do reforço na El. 657,00 m, uma vez que os cenários críticos hipotéticos são muito improváveis de serem atingidos, e mesmo que houvesse uma surgência os fatores de segurança ainda seriam acima dos valores mínimos recomendados. Caso este cenário seja atingido e haja aparecimento de surgências as mesmas deverão ser tratadas.

Embora seja improvável que os cenários hipotéticos sejam atingidos, deve-se avaliar a relação entre os riscos relativos à paralização do reforço na El. 657,00 m e o investimento da execução do reforço até a crista. A freática para o período de 6 meses não é suficiente para provocar a surgência, mas encontra-se bem próxima da face do talude de jusante.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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*. Rio de Janeiro.

Comitê Brasileiro de Barragens - CBDB – Apresentação das Barragens. Disponível em <  
<http://cbdb.org.br/apresentacao-das-barragens>> Acesso em: 03 mar. 2024.

Souza, V. M. O. (2016) *Aspectos Fundamentais para a Análise de Estabilidade de Taludes de Barragens Durante Rebaixamento Rápido*. Monografia de Projeto Final em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia/ UNB, 71 p.