

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Estudo de Percolação em Barragens de Concreto e Terra com Base em Análises Numéricas de Fluxo

Diones Barboza

Engenheiro Civil, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, diones.ub@gmail.com

Cleber de Freitas Floriano

Engenheiro Civil, PUCRS, Porto Alegre, Brasil, cleber.floriano@pucrs.br

RESUMO: O presente trabalho apresenta um estudo de percolação em barragens de concreto e terra com base em análises feitas com o método de elementos finitos, com o objetivo de analisar as condições de fluxo em um caso existente. A estrutura escolhida para o estudo foi a barragem do Ribeirão João Leite, localizada em Goiânia/GO, construída em CCR e maciço de terra. Para a modelagem numérica, foram utilizados parâmetros calibrados em função de resultados de ensaios e valores históricos de pressões e vazões medidos em piezômetros e drenos de alívio. Os resultados das análises indicaram que os dispositivos implantados tiveram eficácia entre 48,32% a 59,16% na redução de vazões, cargas hidráulicas e subpressões nas seções estudadas, com exceção da cortina de injeções no controle de subpressões (4,52%). Os resultados das análises também sugerem que a possibilidade de erosão interna nas condições analisadas é muito baixa. Os dados conhecidos de pressões e vazões foram fundamentais nas análises, garantindo maior confiabilidade e acurácia nos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de fluxo, SEEP/W, Barragens de CCR e terra, Erosão interna e *piping*.

ABSTRACT: This paper presents a water seepage analysis in concrete and earthfill dams using the finite element method. The aim of this study is to investigate the water seepage condition in a real case. For this purpose, the Ribeirão João Leite Dam in Goiânia/GO was selected, which is built in RCC and soil mass. The numerical modeling was conducted using parameters calibrated on the basis of test results as well as historical values of pressure and discharge measured by piezometers and drains, respectively. The analysis results indicated that the devices for sealing and drainage had among 48,32% and 59,16% of effectiveness in reducing the discharges, total head and pore-water pressure for each section studied of the dam. However, the analysis indicated that the grout curtain is inefficacious on the pore-water pressure control (4,52%). The analysis results also indicated that the possibility of internal erosion in such conditions is lower. The available data for pressure and discharge were key factors for the analysis conducted, providing a better reliability and accuracy of results.

KEYWORDS: Seepage Analysis, SEEP/W, RCC and earthfill dams, Internal erosion and piping.

1 Introdução

O presente trabalho aborda o tema de percolação em barragens de concreto e terra a partir de análises numéricas de fluxo utilizando o *software* SEEP/W da GEO-SLOPE *International*, fundamentado no método de elementos finitos. O estudo tem como principal finalidade a avaliação das condições de fluxo, eficácia dos dispositivos de drenagem e tratamento feito em fundações de barragens. A escolha do objeto desse trabalho foi motivada devido à necessidade de estudos mais detalhados de percolação, visto que o conhecimento do comportamento e o controle do fluxo de água são essenciais para a prevenção de acidentes em barragens. Para a validação do método, foram elaborados dois modelos numéricos da Barragem do Ribeirão João Leite, localizada na cidade de Goiânia/GO, construída em CCR (concreto compactado a rolo), e fechamento junto às ombreiras em maciço de terra. Os parâmetros de permeabilidade foram calibrados em função de resultados de ensaios e valores históricos de pressões e vazões medidos em piezômetros e drenos de alívio, objetivando uma análise mais acurada em relação às condições reais da barragem.

2 Caracterização da Barragem

A Barragem do Ribeirão João Leite é do tipo gravidade construída em CCR em um conjunto de 22 blocos, e fechamento junto às ombreiras em maciço de terra com solo argiloso (figura 1). A barragem está localizada na cidade de Goiânia/GO, possuindo 50 m de altura e 451 m de comprimento, sendo operada pela Saneamento de Goiás S.A. (SANEAGO), tendo como finalidade a acumulação de água para utilização no abastecimento público. A barragem possui um conjunto de instrumentos de auscultação que são periodicamente monitorados pela equipe da SANEAGO e atualmente analisados por técnicos da empresa Magna Engenharia Ltda., compreendendo piezômetros, marcos superficiais, prismas óticos de monitoramento, medidores triortogonais de juntas e medidores de vazão.

Segundo o mapeamento geológico, o maciço rochoso onde a barragem está assente é de gnaiss com veios quartzíticos arenizados. Em função disso, as fundações da barragem foram tratadas com cortinas de injeções de calda de cimento para vedação, com as ombreiras recebendo linhas adicionais em virtude de apresentarem padrão de intemperização e fraturamento mais pronunciados.

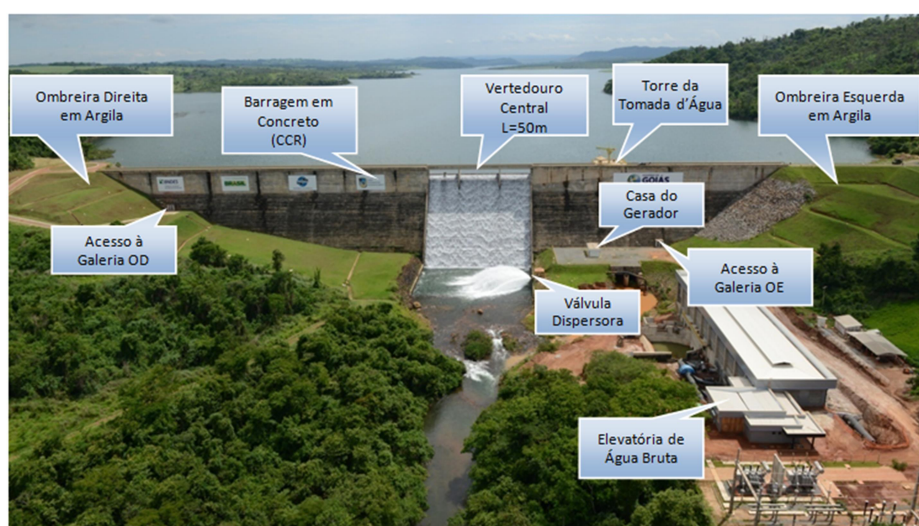


Figura 1. Estruturas da Barragem do Ribeirão João Leite.

3 Metodologia

3.1 Análise de Fluxo pelo Método de Elementos Finitos (MEF)

As análises de fluxo pelo método de elementos finitos conduzidas neste trabalho foram realizadas através do *software* SEEP/W, desenvolvido pela GEO-SLOPE International, o qual consiste em um programa muito utilizado em análises de percolação e problemas de dissipação de poropressão em meios porosos. Existem dois tipos fundamentais de análises: (i) fluxo estacionário; (ii) fluxo transiente. Na análise de fluxo estacionário a carga hidráulica e o fluxo de água são constantes, não apresentando alterações em relação ao tempo. No modo de análise de fluxo transiente as condições de carga hidráulica mudam com o tempo (BROADDUS, 2015). No presente trabalho, foram feitas somente análises numéricas de fluxo estacionário.

3.2 Modelo Numérico de Análise de Fluxo

Nas análises, foi definido um modelo numérico com parâmetros de permeabilidade calibrados em função dos valores medidos em piezômetros (pressão neutra de referência), drenos de alívio (vazão de referência), ensaios de laboratório feitos em amostras do maciço de terra e ensaios *in situ* feitos nos piezômetros fornecidos pela SANEAGO, sendo desconsiderada a anisotropia (relação entre k_y/k_x).



Para as funções de retenção de água e condutividade hidráulica (condição de fluxo em meio não saturado), foram consideradas as funções fornecidas no banco de dados do *software* e dados de literatura. O SEEP/W disponibiliza quatro métodos para a definição da curva característica dos solos, compreendendo função de pontos baseado no tamanho dos grãos, função baseada em amostras típicas para diferentes tipos de solos (fornecida no banco de dados do próprio *software*), método de Fredlund & Xing (1994) e método de Van Genuchten (1980), sendo os dois últimos métodos com equações baseadas em parâmetros de ajustes de curvas (GEO-SLOPE, 2012). No presente trabalho, foram consideradas as funções fornecidas pelo próprio *software* (*Sample Functions*). No maciço de terra, foi considerada a função para *Silt Clay* com teor de umidade volumétrica do solo de $0,47 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Na região do filtro de areia, foi considerada função para *Sand* com teor de umidade volumétrica do solo de $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Cabe ressaltar que as funções fornecidas no banco de dados do SEEP/W são úteis em análises rápidas antes da tomada de decisão da necessidade de ensaios específicos, porém em análises mais detalhadas as funções fornecidas no banco de dados do *software* não podem substituir as curvas características obtidas a partir da interpretação de resultados de ensaios (GEO-SLOPE, 2012).

Para as análises, o coeficiente de variação volumétrica (mv) foi considerado a partir da média dos resultados obtidos em três ensaios edométricos com amostras retiradas do maciço de terra, com o coeficiente de compressibilidade (av) sendo retirado na reta virgem obtida do gráfico. Assim, o coeficiente de variação volumétrica considerado foi de $mv = 4,13 \times 10^{-5} \text{ kPa}^{-1}$.

Foi definido o método de Van Genuchten para a estimativa da função de condutividade hidráulica do maciço de terra e do filtro de areia, considerando quantidade de água residual de $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para ambos os materiais. Os demais materiais foram admitidos dentro do modelo de solos saturados do *software*.

Foram escolhidas para serem estudadas duas seções transversais da barragem, compreendendo uma seção no trecho em CCR (Bloco 6), e outra seção no maciço de terra (Ombreira Esquerda).

3.3 Condições de Contorno

A cota do nível de água adotado a montante na condição de contorno foi de 749 m, em virtude de ser o nível normal operacional do reservatório. Cabe salientar que os valores de referência adotados para a calibração dos parâmetros de permeabilidade foram considerados como as médias de pressões e vazões registradas no histórico da barragem com o nível do reservatório na cota 749 m, de modo a compatibilizar os valores.

Com relação à cota do nível de água a jusante, foi adotada a cota 710 m devido às observações feitas no comportamento de piezômetros instalados na região da ombreira esquerda. Essa informação também foi constatada na época de construção, onde foi necessária a implantação de poços de alívio para o rebaixamento do nível de água para permitir a execução dos aterros da região da ombreira esquerda.

Para reproduzir a pressão dos drenos na galeria de drenagem, foram determinadas linhas de pressão na superfície definida como “dreno”, com a atribuição de valores variáveis visando à aproximação dos valores de pressões e vazões de referência.

3.4 Cálculo da Eficácia dos Dispositivos de Vedação e Controle de Percolação

Segundo Silveira (2006), a eficácia dos dispositivos de vedação e controle de percolação pode ser calculada a partir de expressões propostas por Casagrande (1961). A aplicação desse método neste estudo tem como finalidade a comparação das condições de percolação com a implantação e a hipotética ausência dos dispositivos.

A eficácia da cortina de injeções no controle de percolação é estimada a partir da relação entre a vazão que percola através da fundação após a implantação do tratamento de vedação (Q), pela vazão que percola na fundação sem tratamento (Q_0), conforme a equação 1.

$$E (\%) = \left(1 - \frac{Q}{Q_0}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

A eficácia do sistema de filtros e cortina de injeções na drenagem foi estimada a partir da relação entre a perda de carga hidráulica no eixo de implantação dos dispositivos (ΔH), pela carga hidráulica total na barragem (H), conforme apresentado na equação 2 e figura 2.

$$E (\%) = \frac{\Delta H}{H} \cdot 100 \quad (2)$$

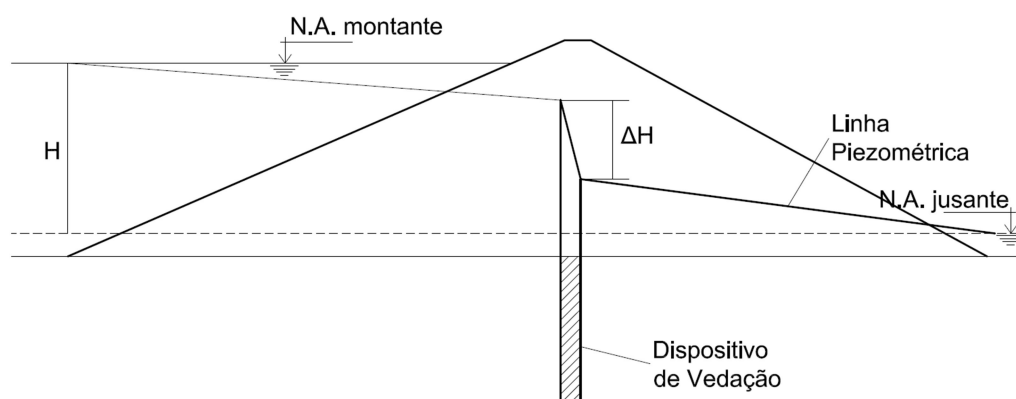


Figura 2. Eficácia dos Dispositivos em Função da Perda de Carga.

Fonte: Adaptado de Silveira (2006).

A eficácia das cortinas de injeções e drenos de alívio no controle da subpressão na base da barragem em CCR é estimada a partir da relação entre a subpressão incidente após a implantação dos dispositivos (u), pela subpressão incidente em uma hipotética ausência dos dispositivos (u_0), aplicando a equação 3.

$$E (\%) = \left(1 - \frac{u}{u_0}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

3.5 Avaliação da Condição de Segurança à Erosão Interna

Usualmente utiliza-se o termo “Erosão Interna e *Piping*” para descrever o fenômeno de erosão interna, gerando certa divergência no meio geotécnico sobre os aspectos conceituais que envolvem o mecanismo. A *International Commission on Large Dams* (2017) descreve o *Piping* como sendo o principal mecanismo de progressão da erosão em fugas concentradas ou erosão regressiva. Na prática, o termo *Piping* refere-se ao ápice do processo de erosão, no entanto é necessário que outros mecanismos ocorram para que a erosão se desenvolva até o estágio final de ruptura.

No presente trabalho, a avaliação da condição de segurança da barragem à erosão interna é abordada a partir da avaliação da magnitude dos gradientes hidráulicos e fluxos ascendentes na saída a jusante da barragem, em função de ser a região mais suscetível às forças contrárias ao peso dos maciços de CCR e terra, uma vez que a tensão vertical estabilizante dessas estruturas é menor nesta região. De acordo com o *U.S. Army Corps of Engineer* (1986), pode ser adotado como fator de segurança à erosão interna valores entre 1,50 a 5,00. O valor a ser adotado depende do conhecimento dos parâmetros do solo e das condições de infiltração, ou seja, quanto maior as incertezas, maior o fator de segurança que deverá ser adotado.

4 Resultados

Após o processo interativo de diversas análises de fluxo estacionário, foi possível definir os coeficientes de permeabilidade através da calibração dos valores numéricos em função dos valores de referência de pressões e vazões. Para a definição dos valores de coeficientes de permeabilidade utilizados foi necessário também uma avaliação coerente dos valores levantados em ensaios específicos feitos

anteriormente. Os coeficientes de permeabilidade calibrados nas análises estão apresentados nas tabelas 1 e 2:

Tabela 1. Coeficientes de Permeabilidade Calibrados – Seção em CCR.

Material	Coef. Permeabilidade (cm/s)
Solo Superficial	$1,00 \times 10^{-3}$
Aterro	$1,00 \times 10^{-6}$
Filtro	$1,00 \times 10^{-3}$
Saprólito	$1,00 \times 10^{-4}$
Gnaiss/Quartzito Fraturado e Alterado	$4,00 \times 10^{-4}$
Gnaiss/Quartzito Pouco Fraturado e Alterado	$5,00 \times 10^{-5}$
Cortina de Injeção 1	$4,00 \times 10^{-5}$
Cortina de Injeção 2	$5,00 \times 10^{-6}$

Tabela 2. Coeficientes de Permeabilidade Calibrados – Seção em CCR.

Material	Coef. Permeabilidade (cm/s)
Maciço de Terra	$5,00 \times 10^{-6}$
Areia (Filtro)	$1,00 \times 10^{-3}$
Saprólito	$5,00 \times 10^{-4}$
Saprólito Duro	$2,00 \times 10^{-4}$
Gnaiss/Quartzito Fraturado e Alterado	$1,00 \times 10^{-5}$
Gnaiss/Quartzito Pouco Fraturado e Alterado	$5,00 \times 10^{-6}$
Cortina de Injeção	$1,00 \times 10^{-7}$

Estão apresentadas nas figuras 3 e 4 a distribuição de cargas hidráulicas totais nas seções estudadas. A divergência entre os valores de referência e numéricos para as pressões neutras estão apresentadas nas tabelas 3 e 4.

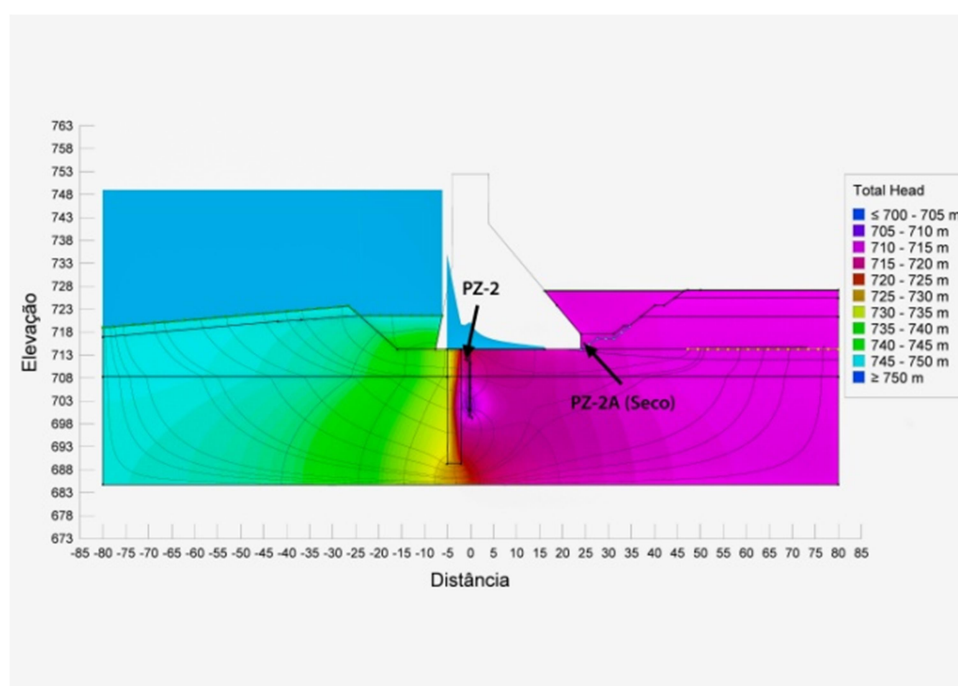


Figura 3. Diagrama de Cargas Hidráulicas Totais na Seção em CCR

Tabela 3. Divergência entre os Valores das Pressões Neutras de Referência e Numéricas na Seção em CCR

Piezômetros	Cota de Instalação (m)	Pressões Neutras (kPa)		Divergência (%)
		Referência	Numérica	
PZ-2	712,090	63,340	62,038	2,05%
PZ-2A	715,530	Seco	-18,262	-

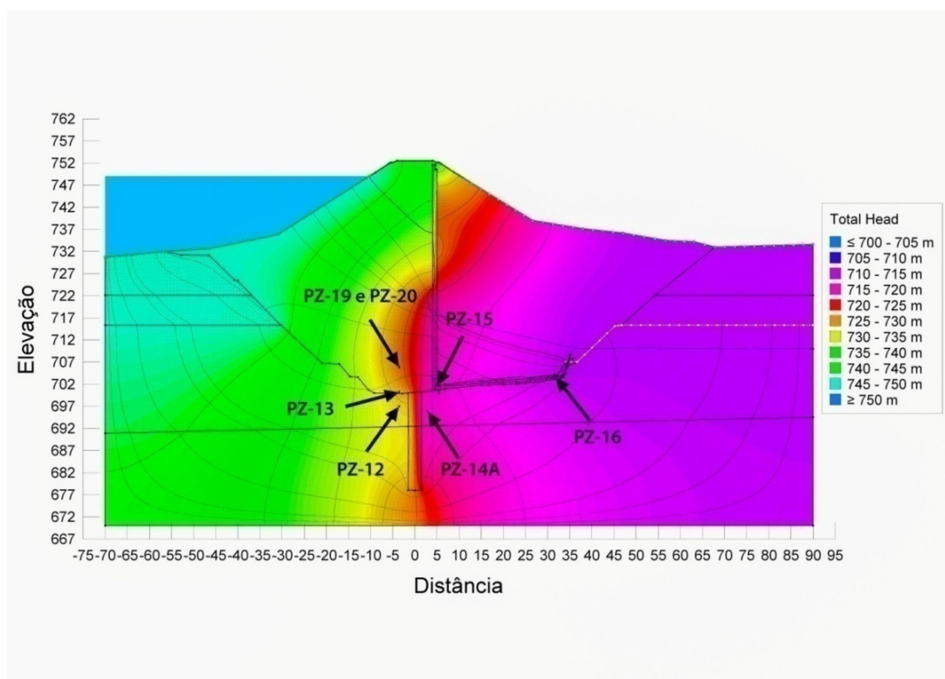


Figura 4. Diagrama de Cargas Hidráulicas Totais na Seção do Maciço de Terra

Tabela 4. Divergência entre os Valores das Pressões Neutras de Referência e Numéricas na Seção do Maciço de Terra

Piezômetros	Cota de Instalação (m)	Pressões Neutras (kPa)		Divergência (%)
		Referência	Numérica	
PZ-12	697,000	297,503	336,000	12,94%
PZ-13	700,250	264,872	287,213	8,43%
PZ-14A	695,920	177,193	205,717	16,10%
PZ-15	700,950	111,373	148,711	33,53%
PZ-16	703,200	88,905	81,238	8,62%
PZ-19	705,900	247,985	202,963	18,15%
PZ-20	705,860	249,894	202,963	18,78%

4.1 Análise do Desempenho dos Dispositivos de Vedação e Controle de Vedação

A estimativa da eficácia da cortina de injeções no controle do fluxo que percola através das fundações da barragem foi feita a partir da comparação entre os resultados das vazões na análise numérica considerando a condição normal, com a hipótese sem cortina de injeções. Os resultados das análises com a aplicação da fórmula 1 estão apresentados na tabela 5:



Tabela 5. Eficácia da Cortina de Injeções

Seção	Q (l/min)	Q ₀ (l/min)	Eficácia (%)
CCR	1,08	2,09	48,32 %
Terra	0,03	0,07	57,14 %

Segundo os resultados da análise numérica e aplicação da Equação 2, a implantação do filtro em conjunto com a cortina de injeções na seção do maciço de terra estabelece uma perda de carga pontual de 18,96 m, indicando eficácia de 48,62% no controle da percolação nesta seção.

Os resultados numéricos de subpressões na Seção em CCR para diferentes cenários estão apresentados a seguir na tabela 6, considerando três hipóteses:

Tabela 6. Resultados de Subpressões na Seção em CCR

Piez.	Subpressão Numérica (kPa)		
	Hipótese sem Dreno	Hipótese sem Cortina	Hipótese sem Dreno e Cortina
PZ-2	151,897	64,973	205,755

Os resultados numéricos da eficácia da implantação dos drenos de alívio e da Cortina de Injeções no controle da subpressão estão apresentados na tabela 7:

Tabela 7. Resultados de Eficácia dos Dispositivos no Controle de Subpressões

Dispositivo	Subpressão Numérica (kPa)		Eficácia (%)
	Cond. Normal	S/ Dispositivo	
Dreno	62,038	151,897	59,16 %
Cortina	62,038	64,973	4,52 %

4.2 Análise de Segurança da Barragem à Erosão Interna

Para a condição normal de operação da barragem, as análises numéricas indicaram que o sentido das componentes verticais dos gradientes hidráulicos na superfície de saída é descendente (valores negativos) nas seções analisadas. Isso ocorre devido à inexistência de fluxo ascensional, podendo ser justificado pelo aumento do percurso de percolação causado pela barreira imposta pela cortina de injeções, prolongamento do aterro e interceptação do fluxo pelos drenos e filtros, sugerindo que eficiência dos dispositivos implantados é satisfatória.

5 Conclusões

Através das análises numéricas de fluxo, chegou-se às seguintes conclusões:

- Os resultados numéricos obtidos para as pressões neutras e vazões foram muito próximos dos valores reais levantados em piezômetros e drenos de alívio instalados na fundação da barragem. As maiores divergências podem ter relação com a adoção de parâmetros fornecidos pelo banco de dados do *software*, pela consideração da condição de permeabilidade isotrópica ou ainda pela precisão do levantamento dos dados nos pontos nodais do modelo numérico;
- Os resultados das análises de eficácia dos dispositivos de vedação e controle de percolação indicaram que os dispositivos reduziram entre 48,32% a 57,14% as vazões e 48,62% as cargas hidráulicas nas seções analisadas. Com relação às subpressões no contato da fundação com a base da seção em CCR, os resultados indicaram que o dreno de alívio reduziu 59,16% das subpressões, enquanto a

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



cortina de injeções reduziu apenas 4,52%, corroborando com dados de literatura técnica que indicam que os drenos de alívio são mais eficazes na diminuição das subpressões nas fundações do que as cortinas de injeções. As cortinas de injeções, por sua vez, reduzem consideravelmente as vazões pelas fundações (TERZAGHI *et al.*, 1996);

- Na análise de segurança da barragem à erosão interna, os resultados das análises numéricas indicaram que a possibilidade de erosão interna é muito baixa para as condições analisadas. Os resultados das análises mostraram a inexistência de fluxo ascendente na região de jusante nas seções analisadas, indicando que a barragem está segura em virtude das soluções adotadas para conter as possibilidades de problemas relacionados à percolação. Essa interpretação só foi possível devido ao conhecimento da condição de contorno para o NA de jusante graças ao monitoramento do comportamento da barragem por instrumentos de auscultação feito ao longo dos anos;
- Os dados históricos de pressões dos piezômetros e vazões dos drenos de alívio tiveram papel fundamental na calibração dos modelos de análises adotados, garantindo maior confiabilidade e acurácia nos resultados.

AGRADECIMENTOS

À Saneamento de Goiás S.A. (SANEAGO) e à empresa Magna Engenharia Ltda., em especial ao Engº Ivaltemir “Tinil” Barros Carrijo e à Engª Rosi Guedes Bernardes, pela oportunidade de divulgação do presente trabalho. Aos colegas engenheiros André Luiz Hebmuller e Juliano Augusto Nietiedt, por todos os ensinamentos passados durante o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Broaddus, M.R. (2015). *Performing a steady-state seepage analysis using seep/w: a primer for engineering students*. 2015. Thesis (Master of Science in Civil Engineering). University of Louisville. Kentucky, USA.
- Casagrande, A. (1961). Control of Seepage through foundation and abutments of dams. *Geotechnique*, v. II, n. 3.
- Geo-Slope International Ltd. (2012). Seepage modeling with SEEP/W: an engineering methodology. July 2012 Edition.
- International Commission on Large Dams. (2017). Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations. In ICOLD Bulletin. Paris, France.
- Silveira, J. F. A. (2006) – *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*. 416 p. Oficina de Textos, 1ª edição.
- Terzaghi, K.; Peck, R.B.; Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3ª Edição. New York, New York: John Wiley & Sons.
- U.S. Army Corps of Engineers.(1986). Engineering and design: seepage analysis and control for dams. EM-1110-2-1901, set, 1986.