

Estudo Tridimensional dos Efeitos das Forças de Percolação em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto

Renato Santos Paulinelli Raposo

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, renatopaulinelli@gmail.com

André Pacheco de Assis

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, aassis@unb.br

RESUMO: As Barragens de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC) são usadas em locais com grandes volumes de escavação obrigatórias em rocha, apresentando baixo custo, grande flexibilidade construtiva e segurança em longo prazo em termos de estabilidade e abalos sísmicos. Melhorias nos critérios de projeto e processos executivos encorajam empreendimentos cada vez mais altos e em vales mais fechados, ou seja, em condições menos favoráveis. Mesmo com os avanços em métodos de simulações numéricas aplicados a projetos, ainda são registrados casos de grandes rupturas na laje de vedação que não foram previstas e surpreendem consultores e especialistas da área. Pelo padrão das rachaduras, são formuladas hipóteses que buscam explicar o fenômeno por meio de resultados de simulações tridimensionais em construção por etapas e as simulações ainda consideram interface entre o enrocamento e o concreto. O presente estudo está embasado no propósito de verificar se as forças de percolação desenvolvidas pela ombreira, formadas com o enchimento do reservatório, tendem ou não a comprimir a barragem como um todo e contribuir para o desenvolvimento de trincas verticais, com o esmagamento do concreto da face de montante dos barramentos, comprometendo assim o seu desempenho. A metodologia é fundamentada em simulações tridimensionais de percolação que fornecem as forças provenientes do fluxo de água posteriormente aplicadas em simulações de tensão-deformação para avaliar o seu efeito sobre a laje. A geometria e os parâmetros da barragem simulada foram embasados em arranjos de BEFC que apresentaram problemas, aplicando algumas variações paramétricas para uma avaliação. Os resultados indicam que o módulo de deformabilidade do enrocamento é o parâmetro mais influente para a formação de esforços na laje e que os maiores esforços de compressão são observados na região superior e central da laje com valores entre 58 e 98 MPa. Houve aumento de até 9% na referida compressão com a adição das forças de percolação, com um acréscimo de até 8 MPa. A abertura das juntas foi observada em todo o perímetro, com valores de até 12 cm. Os valores de compressão são muito superiores aos resistentes do concreto e a abertura das juntas tem comportamento diferente do que se imaginava para critérios convencionais de projeto, que reforça a recomendação de estudos tridimensionais BEFCs, principalmente as construídas em vales fechados.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens, Força de Percolação, Face de concreto, Simulação Tridimensional.

1 INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas utilizadas para criação de lagos artificiais com diversos fins, geração hidrelétrica, irrigação, lazer, armazenamento de rejeitos, entre outros. Suas estruturas principais de barramento da água podem ser construídas com diferentes materiais

constituintes, em duas classificações principais, de concreto ou geotécnicas. As barragens de concreto podem ser convencionais ou compactadas com rolo e as geotécnicas de terra ou enrocamento.

O presente estudo aborda o tipo de barragem geotécnica de enrocamento, que são amplamente utilizadas em locais com grande disponibilidade

de rocha provinda de escavações obrigatórias ou onde é escassa a disponibilidade de solos impermeáveis, principalmente quando se necessita de reservatórios de grande profundidade. No caso estudado, a impermeabilização é feita a partir de uma laje de concreto na face de montante, sendo este tipo denominado de Barragem de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC).

Mesmo com os avanços em métodos de simulações numéricas aplicados a projetos, ainda são registrados casos de grandes rupturas na laje de vedação que não foram previstas e que surpreendem consultores e especialistas da área, uma das razões é devido as usuais simplificações das análises numéricas tridimensionais em relação a modelos constitutivos e considerações da laje e da interação da laje com elementos geotécnicos e das juntas entre as faixas de laje, que nem sempre compõe o mesmo modelo tridimensional. Casos históricos recentes chamam à atenção devido a formação de rachaduras muito maiores que as previstas, sendo que os arranjos problemáticos têm uma característica em comum mais evidente: a grande altura da barragem construída em vale muito fechado. A Figura 1 mostra a laje da UHE Campos Novos, que rompeu com o enchimento do reservatório.

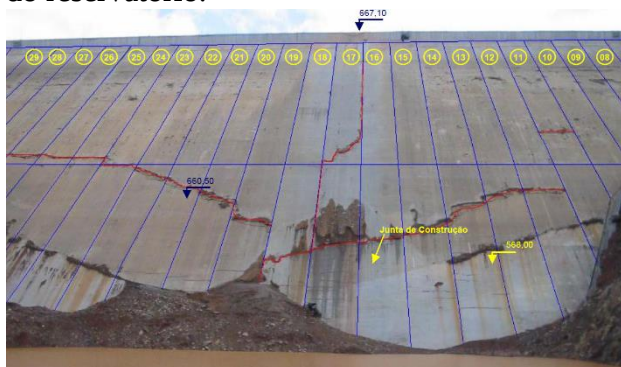


Figura 1 – Rupturas na Laje da UHE Campos Novos, (Sobrinho et al., 2007).

1.1 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar os efeitos das forças de percolação sobre a laje de montante de BEFC, a partir de simulações numéricas embasadas em casos históricos de barragens em operação.

Os objetivos específicos são:

- Observar as características gerais de projetos em BEFCs, com atenção especial para os

casos de rupturas que possam estar relacionados ao objetivo principal e com enfoque na coleta de informações para definição do modelo numérico;

- Analisar uma BEFC hipotética com variação de parâmetros e da profundidade da injeção, de modo a obter dados de forças de percolação nas ombreiras naturais e os efeitos de propagação destas forças no enrocamento na face de concreto;
- Estudar a influência das variações paramétricas para o aumento ou diminuição dos esforços na laje de montante, com ou sem força de percolação.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Projetos de BEFC

O bom desempenho de BEFCs construídas em todo o mundo aliado a evolução nos critérios de projetos com o auxílio de ferramentas numéricas computacionais têm possibilitado a construção de BEFCs cada vez mais altas e em vales muito fechados, porém as principais decisões de projetos no dimensionamento continuam por ser prioritariamente empíricas. Segundo Cruz et al. (2009) o conhecimento atual permite dividir as BEFCs em função da sua altura:

- até 50 m não têm apresentado problemas de qualquer natureza;
- entre 50 m e 100 m têm mostrado fissuras e trincas na laje, as quais são facilmente reparadas com o lançamento de material com finos a montante;
- entre 100 m e 150 m têm apresentado problemas com vazões resultantes dos deslocamentos da face, mas, no geral, têm um bom desempenho;
- entre 150 m e 200 m requerem mais reparos, em razão da maior incidência de trincas e, em alguns casos, da ruptura das lajes;
- da ordem de 200 m são poucas e que requerem mudanças nos requisitos de compactação do enrocamento e na especificação das juntas.

As bases para o projeto e construção de BEFCs foram consolidadas por Cooke & Sherard (1987). Critérios mais complementares podem

hidráulico ou deformações excessivas (Rozhko, 2007).

Uma forma simplificada de demonstrar fisicamente a formulação da força de percolação é a partir da conservação de energia, onde o trabalho é proporcional a variação da carga piezométrica em uma determinada direção, como mostrado por:

$$\Delta W = m_w \cdot g \cdot \Delta h_w \quad (5)$$

onde:

ΔW = variação de energia;

m_w = massa de água;

g = gravidade;

Δh_w = variação de carga piezométrica.

Infer-se então, que o gradiente da energia é proporcional ao gradiente hidráulico naquela direção, dado por:

$$\frac{\partial W}{\partial z} = m_w \cdot g \cdot \frac{\partial h_w}{\partial z} = m \cdot g \cdot i_z \quad (6)$$

onde:

z = direção z ;

i_z = gradiente hidráulico na direção z .

O gradiente da energia tem dimensão de força e é denominada de força de percolação (FP). O produto entre a massa da água (m_w) e a gravidade (g) também tem dimensão de força, este pode ser substituído por:

$$FP_z = \gamma_w \cdot V_w \cdot i_z \quad (7)$$

onde:

FP_z = força de percolação na direção z ;

γ_w = peso específico da água;

V_w = volume de controle.

3 METODOLOGIA

A metodologia para a verificação da hipótese de compressão do barramento como um todo devido às Forças de Percolação (FP) nas ombreiras com uso parametrização de simulações numéricas tridimensional. Foram elaborados três tipos de simulações, uma de percolação e duas de tensão-deformação.

O programa utilizado para as simulações de elementos finitos é o Abaqus ®. O esquema da metodologia do presente trabalho é apresentado na Figura 3, com início na simulação piloto e

finalização com a simulação que considera a força de percolação (FP).

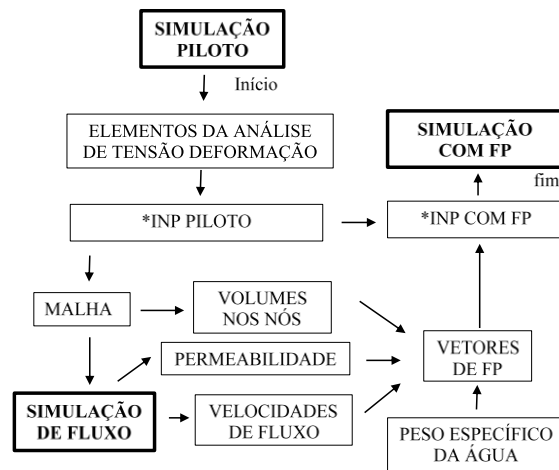


Figura 3 – Simulações (Raposo, 2016).

A primeira modelagem numérica é do tipo tensão-deformação, montada para que se obtenha o arquivo de entrada piloto (*.inp piloto) com a definição da malha, condições de contorno, carregamentos convencionais e uma indicação para a força de percolação.

A segunda simulação é de fluxo, montada com a mesma malha da simulação piloto com a retirada das estruturas de concreto. A simulação de percolação tem por objetivo a obtenção das velocidades de fluxo pela fundação em cada nó.

Os vetores de velocidade de fluxo são multiplicados pelo volume dos elementos nos nós com o uso de uma calculadora já implementada no programa, e os vetores são divididos pela permeabilidade, multiplicados pelo peso específico da água e escritos com uma formatação de entrada do programa Abaqus ® como vetores de FP.

A terceira simulação é rodada pelo texto de entrada da simulação piloto já com a inserção das FP (*inp com FP).

Importante ressaltar que não foram considerados esforços geostáticos da fundação e nem a construção por etapas por camadas de aterro, somente uma parcela de peso próprio do enrocamento, desta forma foi possível filtrar melhor os efeitos das forças de enchimento do reservatório e de percolação. A escolha do programa se baseou devido a calculadora de resultados vetoriais e a possibilidade de entrada das forças em formato texto.

3.1 Geometria

A geometria modelada tem altura de 200 m, crista com comprimento de 500 m, largura da base do vale de 160 m e inclinação do talude em 1V:1.35H.

O indicador de FFV resultante é de 2,77 e o IIR de 18, considerando um módulo de Young do enrocamento de 80MPa e seu peso específico de 22 kN/m³. Os valores estão abaixo da linha de segurança definidas nas Equação 3 e Equação 4.

O vale é adotado como simétrico pela seção central da barragem, o que permitiu a redução do tamanho do modelo pela metade. A Figura 4 exibe uma vista isométrica do modelo.

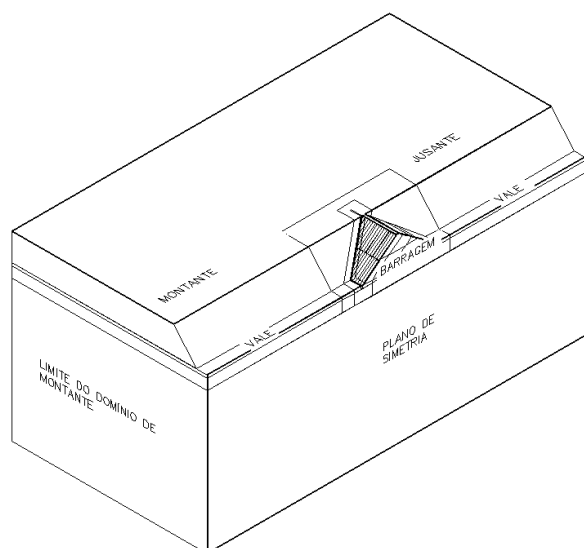


Figura 4 – Vista da BEFC, (Raposo, 2016).

A parametrização da geometria é somente para a injeção de fundação, com variação da profundidade e com a presença ou não de injeção que se estende na ombreira no alinhamento da crista, Tabela 2.

Tabela 2 – Parametrização da injeção de fundação. (Raposo, 2016).

Código	Profundidade (m)	Injeção de crista
I1	20 m	Não
I2	20 m	Sim
I3	60 m	Não
I4	60 m	Sim

Não será realizado estudo paramétrico como de inclinação do vale, inclinação dos taludes somente da profundidade da injeção e existência de injeção de crista, pois o objetivo principal do trabalho é avaliar a influência das forças de

percolação e estas provêm do gradiente hidráulico.

3.2 Parâmetros dos Materiais

As análises de tensão-deformação são do tipo linear elástica e percolação em fluxo permanente em meio saturado, desta forma são dispensados valores de resistência e de não saturação do solo.

Importante ressaltar que não foram executados ensaios específicos para obtenção nenhum dos parâmetros utilizados nos modelos, todos foram adotados a partir de valores típicos dos materiais de projetos semelhantes, nos limites típicos máximos e mínimos nos valores dos parâmetros dos materiais. Os arranjos de parâmetros do presente trabalho foram pensados para que o comportamento seja paramétrico, com a avaliação de algumas variações que possam indicar mudanças na compressão da laje de montante.

Os parâmetros são apresentados na Tabela 3, onde os materiais 1, 2, 3 e 4 correspondem ao enrocamento, fundação, concreto e injeção, respectivamente.

Tabela 3– Parâmetros dos materiais (Raposo, 2016).

	E (MPa)	ν	γ (kg/m ³)	k (m/s)
1	Tabela 4	0.25	2200	0.1
2	Tabela 4	0.25	2200	Tabela 5
3	25.000	0.2	2500	-
4	300	0.25	2200	1x10 ⁻¹⁰

As variações paramétricas foram feitas no módulo de elasticidade dos enrocamentos, da fundação (Tabela 4) na simulação de tensão-deformação e na permeabilidade na simulação de percolação (Tabela 5).

Tabela 4 – Parametrização dos módulos de Young (MPa) (Raposo, 2016).

Código	F1	F2	F3	F4	E1	E2	E3
Y1	120	200	200	300	30	60	90
Y2	120	200	200	300	60	90	120
Y3	200	300	400	600	30	60	90
Y4	200	300	400	600	60	90	120

Tabela 5 – Parametrização das permeabilidades dos materiais de fundação (m/s) (Raposo, 2016).

Código	F1	F2	F3	F4
P1	1 x10 ⁻⁶	1 x10 ⁻⁶	1 x10 ⁻⁷	1 x10 ⁻⁷
P2	1 x10 ⁻⁵	1 x10 ⁻⁵	1 x10 ⁻⁸	1 x10 ⁻⁸
P3	1 x10 ⁻⁸	1 x10 ⁻⁸	1 x10 ⁻⁸	1 x10 ⁻⁸

4 RESULTADOS

A exposição e a análise das figuras são feitas em somente uma das simulações pois o comportamento global dos resultados é muito semelhante entre os diferentes arranjos em relação a distribuição dos vetores de fluxo, tensões e deslocamentos.

4.1 Fluxo

A Figura 5 mostra os vetores de gradiente de fluxo, que seguem um sentido circular em torno da injeção de fundação e o sentido é de montante de jusante. Os vetores de forças de percolação têm mesmas direções, sentidos e distribuição de módulos dos vetores de gradiente hidráulico para um mesmo material, mas com magnitudes e unidades diferentes.

4.2 Deslocamentos

Os deslocamentos calculados com o modelo linear elástico não representam em sua plenitude os materiais geotécnicos mas podem fornecer uma ordem de grandeza em relação ao comportamento global.

A Figura 6 mostra as isolinhas de magnitude dos deslocamentos máximos em metros, ampliado em 50 vezes da laje de montante. As juntas entre os panos de laje se abrem na parte inferior, enquanto a parte superior permanece em contato com transferência de compressão entre elas. A abertura máxima das juntas observada em

todas as análises está localizada sempre na mesma região, como indicado na Figura 6.

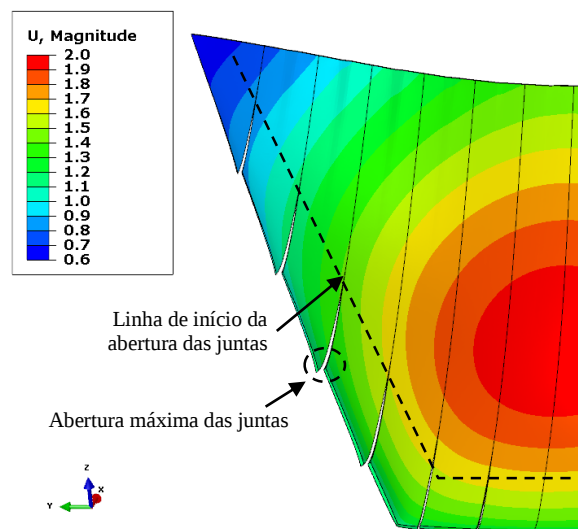


Figura 6 – Magnitude (m) dos deslocamentos nas lajes com ampliação de 50 vezes (Raposo, 2016).

4.3 Esforços

Os esforços que se desenvolvem na laje são completamente dependentes dos efeitos tridimensionais do vale fechado, com compressão na região central da laje perto da crista e efeitos de flexão na base, mais intensas nas proximidades do talude do vale. Os valores negativos são compressão (azul) e positivos de tração (vermelho), as Figura 7 e Figura 8 mostram os esforços na direção YY em cima e em baixo da laje de montante, respectivamente.

As tensões máximas de compressão incidem na região central e superior da laje, tanto abaixo

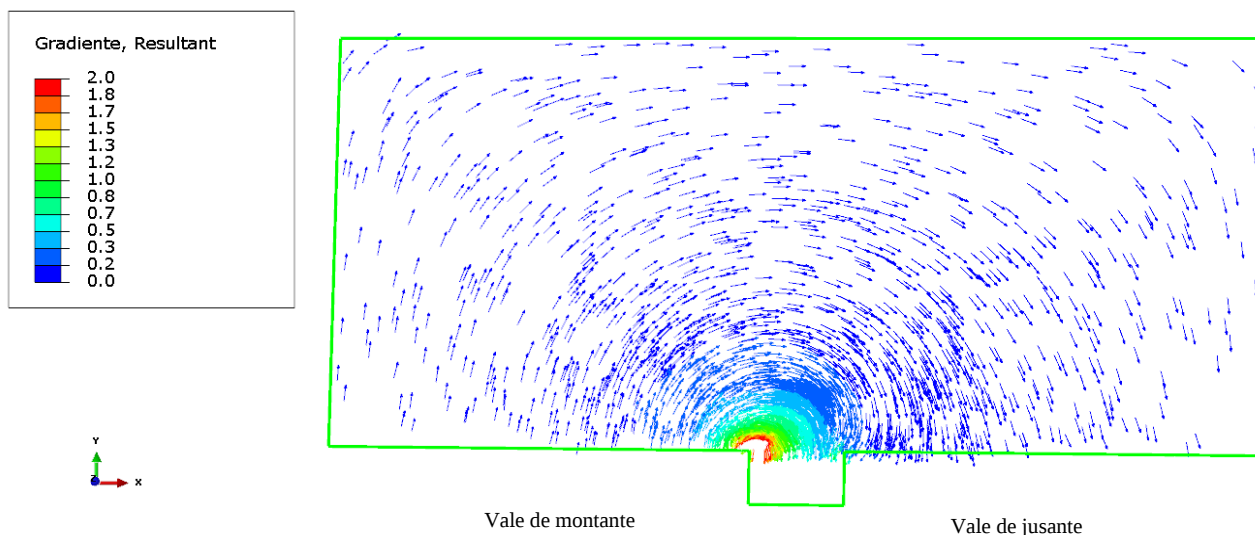


Figura 5 – Vista superior da seção na elevação 100 m com os vetores dos gradientes (Raposo, 2016).

quanto acima em valores praticamente iguais, já os esforços máximos de tração estão localizados no perímetro inferior da laje, onde é formada um binário de flexão com tração em baixo e compressão em cima.

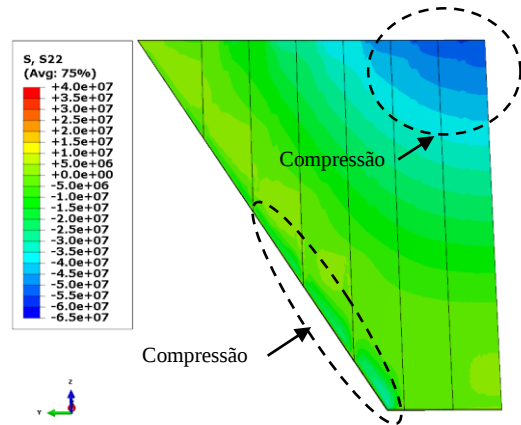


Figura 7 – Tensões YY em cima da laje de montante (Raposo, 2016).

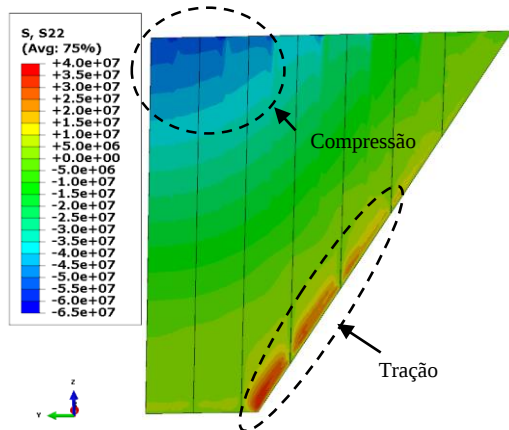


Figura 8 – Tensões YY em baixo da laje (Raposo, 2016).

Importante ressaltar que não foram considerados os alívios de tensão por uma junta de borracha, mas as faixas estão livres para se separar, por isso não podem transferir esforços de tração de uma para outra.

4.4 Análise Paramétrica

O estudo da influência das variações de geometria e de parâmetros é feito em duas partes, primeiro com as diferenças entre os esforços máximos de compressão que incidem nas faixas de lajes e posteriormente com a abertura máxima das juntas, com e sem a força de percolação (FP). As magnitudes de tensões de compressão encontradas nas várias simulações estão na ordem 50 até 100 Mpa. Os valores são muito

superiores aos típicos de resistência do concreto para compressão e exigiria muita armadura para flexão, sem a consideração da junta de borracha. A aplicação das forças de percolação no modelo gerou um acréscimo de no máximo 9% desta compressão, um valor de até 8 MPa. As trações estão na ordem de 30 a 50 Mpa. A abertura máxima das juntas entre as lajes foi observada na proximidade do plinto e apresentam valores entre 9 a 12 cm com a força de percolação e de 7 a 9 cm sem. Análises mais aprofundadas com modelos constitutivos que consideram plastificação e endurecimento devem apresentar valores mais acurados.

A força de percolação gerou aumento de 1,2 a 4 cm na abertura das juntas, com aumento de 12 a 30% de deslocamento adicional dentre as 48 simulações. O afastamento adicional das faixas de laje pode gerar um aumento significativo no fluxo de água, afetando diretamente o desempenho do barramento.

A Tabela 6 mostra as médias das tensões máximas de compressão e de abertura na laje com as variações paramétricas do módulo de Young. Observa-se na tabela que a compressão chega a variar em mais de 30% e a abertura das juntas 17% com a parametrização dos módulos do enrocamento. As forças de percolação só apresentam variações significativas com a abertura das juntas com variação no módulo da fundação.

Tabela 6 – Média das variações dos módulos de Young.			
Tensões	Enrocamento (%)		Fundação (%)
	$\sigma_{Y2} - \sigma_{Y1}$	-26,4 (FP)	$\sigma_{Y3} - \sigma_{Y1}$ -13.9 (FP)
	σ_{Y2}	-27,2	σ_{Y3} -13.6
	$\sigma_{Y4} - \sigma_{Y3}$	-35,0 (FP)	$\sigma_{Y4} - \sigma_{Y2}$ -21.6 (FP)
	σ_{Y4}	-34,2	σ_{Y4} -19.7
Abertura	$\delta_{Y2} - \delta_{Y1}$	-14.7 (FP)	$\delta_{Y3} - \delta_{Y1}$ -1.8 (FP)
	δ_{Y2}	-15.7	δ_{Y3} -8.5
	$\delta_{Y2} - \delta_{Y1}$	-17.0 (FP)	$\delta_{Y3} - \delta_{Y1}$ -3.8 (FP)
	δ_{Y2}	-17.6	δ_{Y3} -10.3

Nota-se na Tabela 7 que a média de variação mais importante na parametrização da injeção é relativo à profundidade de injeção, onde a força de percolação muda o a abertura das juntas em mais de 10%.

As variações nas permeabilidades dos materiais só geram mudanças com aplicação das forças de percolação, então a Tabela 8 omite os valores igual a zero. Os valores de tensões

variam em menos de 3% e de abertura das juntas menos de 5%.

Tabela 7 – Média das variações da injeção.

	Prolongamento Crista (%)		Profundidade (%)	
Tensões	$\frac{\sigma_{I2} - \sigma_{I1}}{\sigma_{I2}}$	0,2% (FP)	$\frac{\sigma_{I3} - \sigma_{I1}}{\sigma_{I3}}$	0,7% (FP)
	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I3}}{\sigma_{I4}}$	-0,1%	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I2}}{\sigma_{I4}}$	-3,0%
	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I3}}{\sigma_{I4}}$	0,8% (FP)	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I2}}{\sigma_{I4}}$	1,8% (FP)
	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I3}}{\sigma_{I4}}$	0,2%	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I2}}{\sigma_{I4}}$	-2,6%
Abertura	$\frac{\delta_{I2} - \delta_{I1}}{\delta_{I2}}$	-4,0% (FP)	$\frac{\delta_{I3} - \delta_{I1}}{\delta_{I3}}$	-5,4% (FP)
	$\frac{\delta_{I2} - \delta_{I1}}{\delta_{I2}}$	-3,9%	$\frac{\delta_{I3} - \delta_{I1}}{\delta_{I3}}$	6,7%
	$\frac{\delta_{I2} - \delta_{I1}}{\delta_{I2}}$	1,4% (FP)	$\frac{\delta_{I3} - \delta_{I1}}{\delta_{I3}}$	0,6% (FP)
	$\frac{\delta_{I2} - \delta_{I1}}{\delta_{I2}}$	1,1%	$\frac{\delta_{I3} - \delta_{I1}}{\delta_{I3}}$	11,5%

Tabela 8 – Média das variações de permeabilidade

Tensões (%)		Abertura (%)	
$\frac{\sigma_{P2} - \sigma_{P1}}{\sigma_{P2}}$	0,3% (FP)	$\frac{\delta_{P2} - \delta_{P1}}{\delta_{P2}}$	-1,0% (FP)
$\frac{\sigma_{P3} - \sigma_{P1}}{\sigma_{P3}}$	-2,3% (FP)	$\frac{\delta_{P3} - \delta_{P1}}{\delta_{P3}}$	3,7% (FP)
$\frac{\sigma_{P3} - \sigma_{P1}}{\sigma_{P3}}$	-2,6% (FP)	$\frac{\delta_{P3} - \delta_{P2}}{\delta_{P3}}$	4,6% (FP)

5 CONCLUSÕES

Os vetores de gradiente da fundação que geram as forças se desenvolvem de forma circular em torno da injeção de fundação e mesmo que ocorra uma compressão do enrocamento, os vetores favoráveis à montante e a pressão do reservatório aliviam muito os efeitos de compressão sobre a laje de concreto e tendem a aumentar a abertura das juntas entre as faixas da laje.

Com os resultados obtidos na pesquisa, nota-se que as forças de percolação aumentam os esforços de compressão na laje em menos de 10% os arranjos analisados. Os esforços de compressão excessiva nas juntas centrais das faixas de laje são gerados independentemente das forças de percolação. Já para a abertura das juntas entre as faixas de laje, as forças de percolação induziram um aumento de 12 a 30% no espaçamento entre as faixas, que se não estiverem bem vedadas, pode aumentar significativamente a perda de água do reservatório.

Os resultados mostram que a magnitude dos esforços de compressão entre as faixas centrais da laje, sem juntas para alívio de compressão, pode ser se tornar muito superior à resistência do concreto armado, mesmo sem considerar os efeitos de fluxo pelas ombreiras. A ruptura nessa

região deve ser analisada em simulação tridimensional com consideração da laje no modelo, principalmente em vales mais fechados.

A recomendação clássica de projetos de BEFCs é que as juntas centrais estariam submetidas inteiramente à compressão, porém as juntas se abrem em todo perímetro da laje no modelo analisado. O software utilizado permite a entrada de malhas descontínuas que podem interagir umas com as outras e permitir a compressão, atrito e a abertura da malha. Desta forma é possível estimar os deslocamentos relativos e especificar os tipos de juntas no projeto por valores realmente calculados por modelos tridimensionais.

AGRADECIMENTOS

Aos professores e colegas do programa de pós-graduação em geotecnia na UnB, ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ICOLD. (2010). Concrete face rockfill dams – concepts for design and construction. Bulletin 141, 408 p.
- Cooke, J.B. & Sherard, J.L. (1987). Concrete face rockfill dam. J. Geotechnical Eng. Div. ASCE, New York, 133 (10): 1113-1132.
- Cruz, P.T., Materón, B. & Freitas, M. (2009). Barragens de enrocamento com face de concreto - Concrete face rockfill dam. Oficina de Texto, São Paulo. 448 p.
- Frutuoso, A. (2007). Análises tridimensionais de barragens de enrocamento com face de concreto com objetivo de otimizar os critérios de projeto. Universidade de Brasília. 169 p.
- Raposo, R.S.P. Estudo Tridimensional dos Efeitos das Forças de Percolação em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto. Publicação G.DM-264/16. Universidade de Brasília. 153 p.
- Rozhko, A. (2007). Role of seepage forces on hydraulic fracturing and failure patterns (September). 128 p.
- Sobrinho, J.A., Xavier, L. V., Albertoni, S.C. & Pereira, R.F. (2007). Usina hidroelétrica campos novos - barragem de enrocamento com face de concreto - relato do desempenho, ocorrências e recuperação na face da barragem. XXVII Semin. Nac. Gd. Barragens, pp. 1–15.