

Influência da Fundação de uma Barragem de Terra Utilizada para Deposição de Rejeito e Água na Análise Tensão-Deformação

Isabela Grossi da Silva

Engenheira Civil Geotécnica, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, isa.grossisilva@gmail.com

Marcio F. Leão

Geólogo-Geotécnico, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, marcio.leao@tractebel.engie.com

RESUMO: O comportamento das barragens de rejeito ainda é um assunto relativamente novo no meio geotécnico com diversos assuntos a serem estudados. O objetivo do estudo foi analisar o comportamento tensão-deformação de uma barragem de contenção de rejeitos e água com cerca de 50 m de altura na seção crítica de maior altura, considerando diferentes cenários em relação à presença ou não de descontinuidade na fundação, bem como a direção e mergulho dessa. Foram analisados 4 cenários, sendo um deles de referência, isto é, fundação sem descontinuidade, o segundo com descontinuidade horizontalizada e os demais com presença de descontinuidade com mergulho para montante e para jusante em relação ao eixo da barragem. Verificou-se que a presença de descontinuidade na fundação interfere no comportamento tensão-deformação da barragem, sendo o perfil de deslocamento amplamente modificado e há concentração de tensão e deformação cisalhante pela presença deste elemento na fundação.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, Rejeito, Tensão-deformação, Fundação, Descontinuidade.

ABSTRACT: The behavior of tailings dams is still a relatively new subject in the geotechnical environment with several subjects to be studied. The article analyzed the stress-strain behavior of a tailings and water containment dam with a height of about 50 m in the highest critical section, considering different scenarios in relation to the presence or not of discontinuity in the foundation, as well as the direction and dip of this one. Four scenarios were analyzed, one of them being a reference, that is, foundation without discontinuity, the second with horizontal discontinuity and the others with the presence of discontinuity with dip upstream and downstream in relation to the dam axis. It was found that the presence of discontinuity in the foundation interferes with the stress-strain behavior of the dam, with the displacement profile being widely modified and there is a concentration of stress and shear strain due to the presence of this element in the foundation.

KEYWORDS: Dam, Tailing, Stress-Strain, Foundation, Discontinuity

1 INTRODUÇÃO

A Lei 14.066 de 2020 sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) estabelece a definição de barragem como “qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas” (Brasil, 2020).

Dentre os diferentes tipos de barragens, estão as barragens de aterro que podem ser de seção homogênea ou zoneada. As barragens de seção homogênea são as barragens de terra que podem ter ou não elementos filtrantes em seu interior a depender do estudo de percolação. As barragens zoneadas são, normalmente, as de enrocamento que possuem um núcleo considerado impermeável (argila, material asfáltico ou face de concreto) e os taludes de material permeável.

As barragens de terra homogêneas com elementos drenantes possuem um filtro, que pode ser vertical ou inclinado, ligado a um filtro horizontal ou tapete drenante abaixo do seu talude de jusante com o objetivo de guiar a água percolada pela barragem para fora da estrutura de forma segura. Além disso, em parte de sua face de montante apresenta-se o rip-rap que é composto por material granular que impede a erosão da região do talude sujeita a onda do reservatório.

Magalhães (2017) comenta que características da fundação, como deformabilidade e permeabilidade, influenciam na seleção do tipo de barragem. Por exemplo, barragens de terra podem ser assentadas em

fundações menos resistentes e mais deformáveis quando comparado com barragens de enrocamento e de concreto. Além disso, as características de resistência da fundação podem condicionar a declividade dos taludes da barragem, fator importante para definição da seção da barragem. Quando barragens de aterro são assentadas sobre fundações rochosas, dificilmente se tem problemas relacionados à resistência deste material. Neste caso, torna-se importante avaliar a percolação de água através de fissuras e porosidade da rocha. A determinação da permeabilidade dos terrenos rochosos é feita por ensaios de perda d'água, sob pressão, realizados em furos de sondagens rotativas (Soares, 2010).

As fundações das barragens devem ser identificadas quanto a sua geologia e propriedades, como resistência, deformabilidade e permeabilidade. É importante mapear seu fraturamento e evidências de movimentações precedentes (Soares, 2010), quando a fundação é composta por maciços rochosos.

Soares (2010) afirma que as fundações são consideradas uma das principais condicionantes ao desenvolvimento de acidentes em barragens, sejam estas construídas com rejeitos ou por meio das técnicas convencionais. O autor ainda afirma que a fundação da barragem deve proporcionar um suporte estável das estruturas sob condições de carregamento e saturação, sem sofrer deformações excessivas, uma vez que essas deformações tenderiam a resultar no desenvolvimento de fraturas no corpo das barragens resultantes do recalque diferencial.

Neste intuito, o mapeamento geológico da fundação da barragem e da área alagada pelo reservatório tem extrema relevância quanto ao adequado comportamento da estrutura. Caso não seja realizado a caracterização desta região, descontinuidades presentes na fundação podem comprometer seu desempenho. Isto é, mesmo que a rocha predominante na fundação tenha parâmetros geotécnicos considerados adequados ao empreendimento implantado, as descontinuidades presentes nesses locais podem condicionar o comportamento da estrutura. Quando o mapeamento geológico é realizado e são identificadas fraturas ou descontinuidades na fundação, são previstos tratamentos locais com o objetivo de aumentar a resistência do maciço e/ou diminuir a permeabilidade do material ou mesmo controlar o fluxo de água que percola pela fundação. Este trabalho tem o intuito de apresentar a influência da presença de descontinuidade na fundação de uma barragem de terra utilizada para deposição de água e rejeito em relação à análise de tensão-deformação.

2 METODOLOGIA

Inicialmente foi definida a seção da estrutura, bem como os parâmetros geológico-geotécnicos para as análises. A barragem de terra é de seção homogênea com elementos drenantes em seu interior e proteção em determinada parte da sua face de montante (Figura 1). A estrutura é assentada sobre filito com marcantes descontinuidades. Foi também realizada verificação da influência do mergulho da descontinuidade para o comportamento tensão-deformação da estrutura.

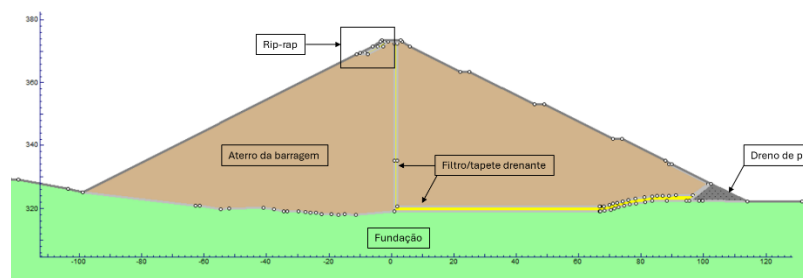


Figura 1. Seção transversal da barragem e seus elementos constituintes.

2.1 Propriedades Geotécnicas

Os materiais do aterro da barragem, os sistemas drenantes e a fundação da barragem foram considerados com comportamento constitutivo regido por Mohr-Coulomb no regime elástico. Para a descontinuidade se utilizou o modelo de Barton-Bandis. Mohr-Coulomb define que a tensão cisalhante (τ) é composta por uma parcela de coesão (c) somada ao produto da tensão normal atuante (σ) pela tangente do ângulo de atrito (ϕ), conforme Equação 1.

$$\tau = c + \sigma \cdot tg\phi \quad (1)$$

O critério de Barton-Bandis (1982) foi criado de forma empírica a partir de ensaios de cisalhamento em juntas artificiais, para determinação da resistência ao cisalhamento de descontinuidades que apresentam rugosidade (Equação 2), onde τ é a resistência ao cisalhamento, σ_n é a tensão normal, ϕ é o ângulo de atrito básico da rocha intacta, JRC é o coeficiente de rugosidade da junta e JCS é a resistência à compressão uniaxial das paredes das descontinuidades. O valor de JRC é obtido por comparação visual entre a rugosidade padrão e existente. O JCS é determinado através de medição em campo.

$$\tau = \sigma_n tg \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi \right] \quad (2)$$

Os parâmetros foram obtidos de ensaios de laboratório. No entanto, como o foco do trabalho é a análise de tensão-deformação em função da presença de descontinuidades, são exibidos apenas os valores na Tabela 1. O aterro da barragem foi classificado como um solo argilo-siltoso; o rejeito é proveniente de minério de ferro; a fundação é de filito; a descontinuidade presente na fundação de filito teve parâmetros obtidos através das observações em campo do mapeamento geológico realizado; e, os parâmetros dos materiais do sistema drenante e de proteção (areia e enrocamento) são os usualmente empregados para tais finalidades.

Tabela 1. Parâmetros do aterro da barragem.

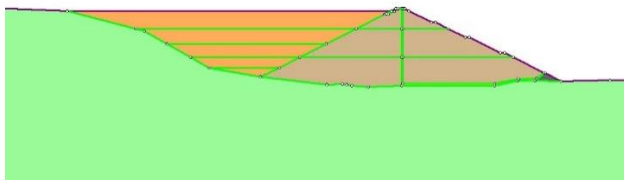
Parâmetro	Material			Unidade
	Aterro da barragem	Rejeito	Fundação de filito	
Peso específico	19	26	22	kN/m ³
Coesão	20	0	48	kPa
Ângulo de atrito	25	35	27	Graus
Módulo de elasticidade	20	10	70	Mpa
Coeficiente de Poisson	0,33	0,30	0,20	-
Coeficiente de permeabilidade	3,60E-08	2,25E-06	5,0E-06	m/s
Parâmetro	Enrocamento	Areia	Descontinuidade	Unidade
Peso específico	23	21	-	kN/m ³
Coesão	0	0	-	kPa
Ângulo de atrito	40	30	0	Graus
Módulo de elasticidade	110	100	3	Mpa
Coeficiente de Poisson	0,30	0,30	0,20	-
Coeficiente de permeabilidade	1,00E+00	1,00E-04	-	m/s
JCS	-	-	10	Mpa
JRC	-	-	4	-

2.2 Análise numérica

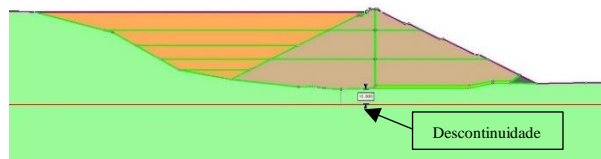
Para a análise tensão-deformação foi utilizado o *software* RS2 da Rocscience®. Os cenários analisados, considerando a presença ou não de descontinuidade, bem como a influência do mergulho são apresentados na Figura 2. O cenário 1 é referencial para os demais, por não apresentar descontinuidade (Figura 2A). No cenário 2, há presença da descontinuidade horizontal a 10 m de profundidade (Figura 2B). O cenário 3 possui a descontinuidade com mergulho a jusante com 30° (Figura 2C). Por fim, no cenário 4 a descontinuidade possui mergulho a montante de 30° (Figura 2D). A cota máxima de disposição do rejeito foi 371,50 m, 2 m abaixo da cota da crista da barragem.

No programa de análise numérica utilizado, ao inserir uma descontinuidade no modelo é necessário definir a condição de extremidade desse material, sendo que extremidade fechada significa que não há movimento relativo (deslizamento ou abertura) nos pontos extremos da junta e a condição aberta permite movimento relativo (RS2 ROCSCIENCE, 2022). No presente estudo não foi considerado movimento relativo na descontinuidade, pois a seção foi modelada grande o suficiente para simular essa condição.

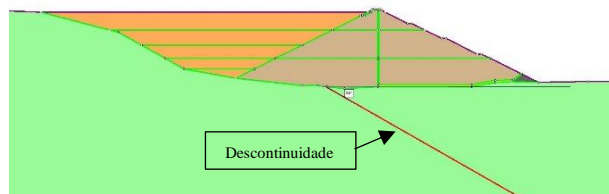
A) Cenário 1 – referência – sem descontinuidade



B) Cenário 2 – descontinuidade horizontal a 10 m de profundidade



C) Cenário 3 – descontinuidade com mergulho a jusante de 30°



D) Cenário 4 – descontinuidade com mergulho a montante de 30°

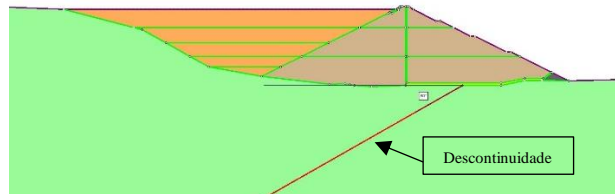


Figura 2. Seções analisadas.

Em relação às condições aplicadas, apresenta-se a Figura 3 em que para a malha de elementos finitos utilizada, optou-se por uma graduada com elementos triangulares de 6 nós. As condições de contorno utilizadas para a percolação foram livre no talude de jusante da barragem e carga de água na EL. 372 m sobre o rejeito para o estágio final. As restrições aplicadas foram de livre movimentação na superfície e restrições em XY na lateral e base do modelo.

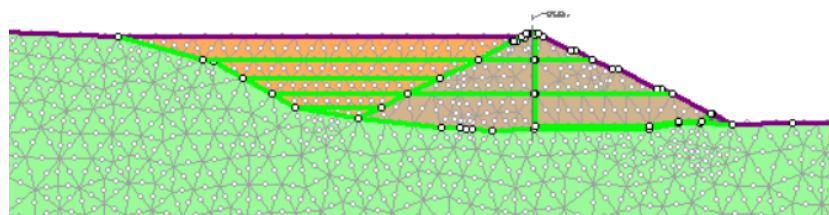


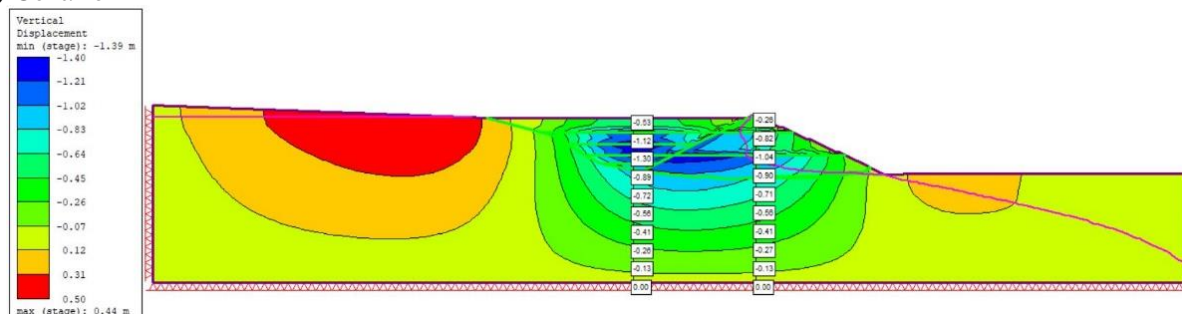
Figura 3. Malha aplicada no modelo.

3 RESULTADOS

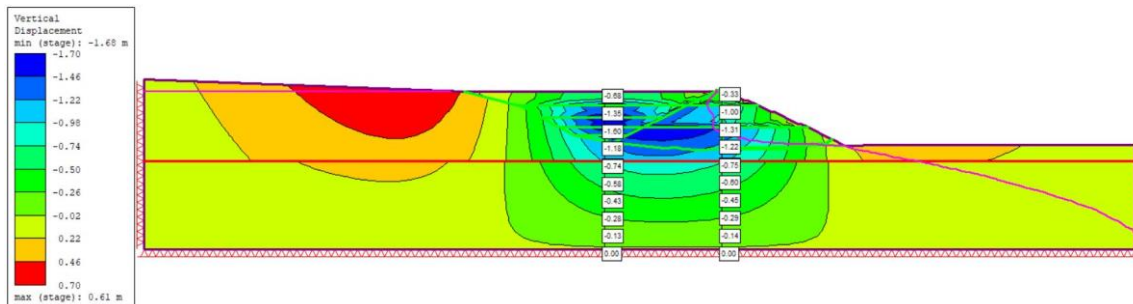
Os resultados obtidos são apresentados de maneira comparativa em relação: aos deslocamentos verticais e horizontais, tensão efetiva média e deformação máxima cisalhante para os 4 cenários simulados.

A Figura 4 apresenta os deslocamentos verticais obtidos com o modelo numérico. O cenário 1 resultou em recalque máximo de 1,39 m (Figura 4A), o cenário 2 de 1,68 m (Figura 4B), o cenário 3 de 1,88 m (Figura 4C) e o cenário 4 de 1,80 m (Figura 4D). A região que resultou o maior recalque variou em relação aos cenários executados. Para o cenário 1 e 2, a região com maior deslocamento vertical foi central do rejeito e no espaldar de montante da barragem. Para o cenário 3 e 4, o perfil de deslocamento modifica drasticamente e a região central do aterro da barragem, na qual a descontinuidade está localizada, obteve os maiores recalques, indicando que o mergulho da descontinuidade interfere em tal resultado. Além disso, observa-se que em todos os cenários o terreno apresentou sobre-elevação do terreno a montante do rejeito e na fundação a jusante da barragem.

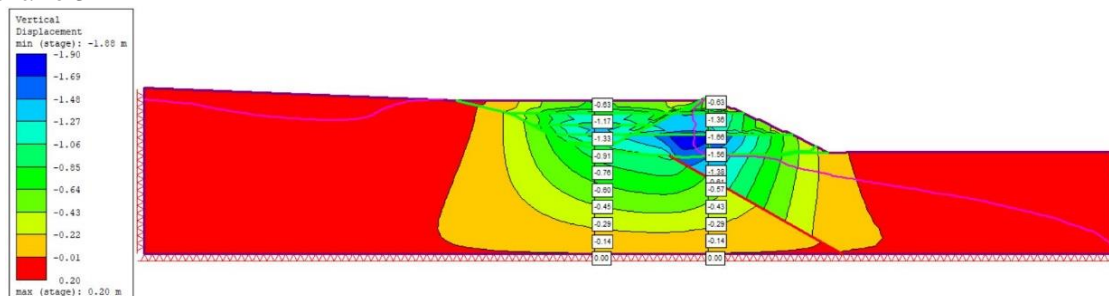
A) Cenário 1



B) Cenário 2



C) Cenário 3



D) Cenário 4

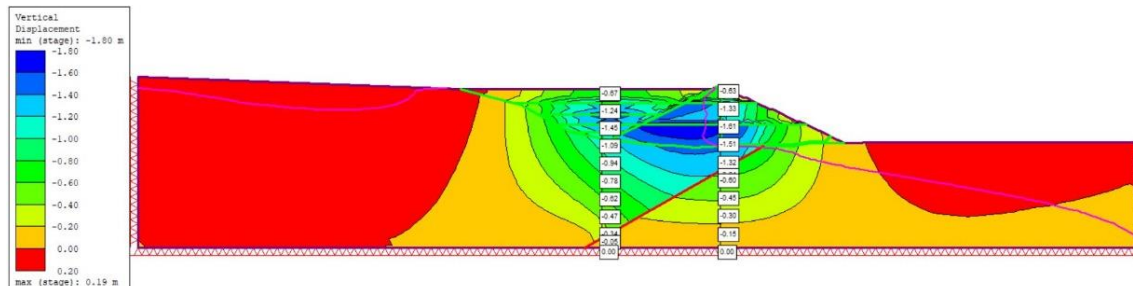
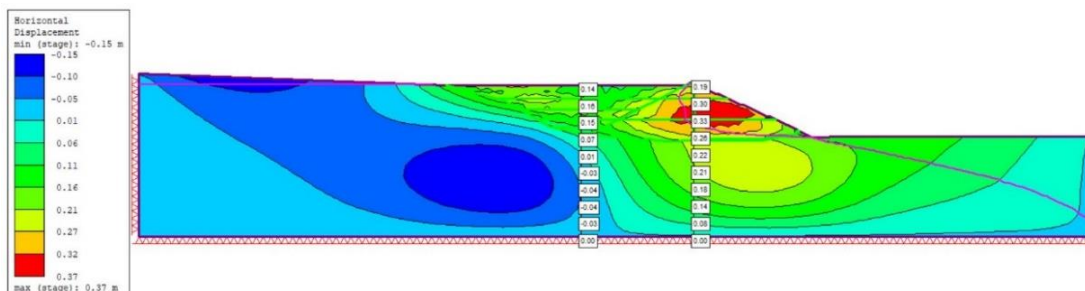


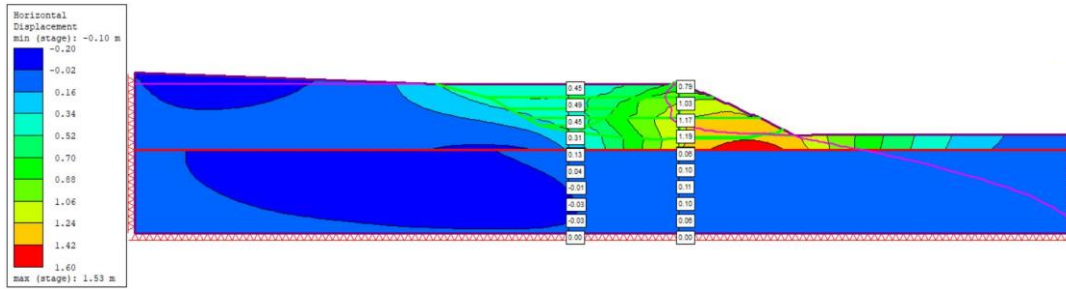
Figura 4. Deslocamento vertical.

A Figura 5 apresenta a distribuição dos deslocamentos horizontais na seção analisada, sendo estes distintos para cada cenário. Em todos os cenários o maior deslocamento foi no sentido de jusante da barragem (valor positivo) e o deslocamento horizontal resultante do cenário 2 foi consideravelmente maior quando comparado com os demais, indicando que para este caso a presença de descontinuidade horizontalizada seria a pior situação. O cenário 1 resultou em deslocamento máximo de 0,37 m na região central do espaldar de jusante da barragem (Figura 5A). O cenário 2 apresentou deslocamento de 1,53 m na região da descontinuidade localizada abaixo do espaldar de jusante da barragem (Figura 5B). Já para o cenário 3 o deslocamento foi de 0,78 m na região central da descontinuidade (Figura 5C). Por fim, o cenário 4 mostrou deslocamento de 0,46 m na região central e inferior a descontinuidade (Figura 5D).

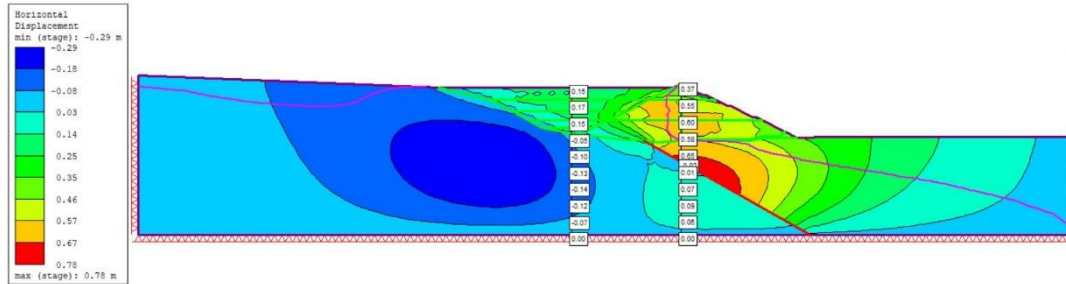
A) Cenário 1



B) Cenário 2



C) Cenário 3



D) Cenário 4

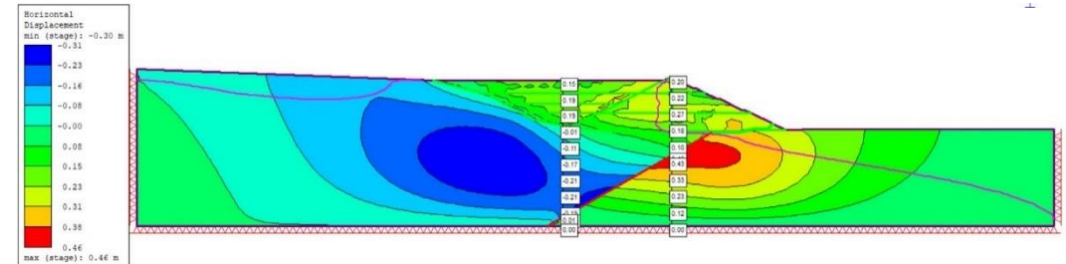
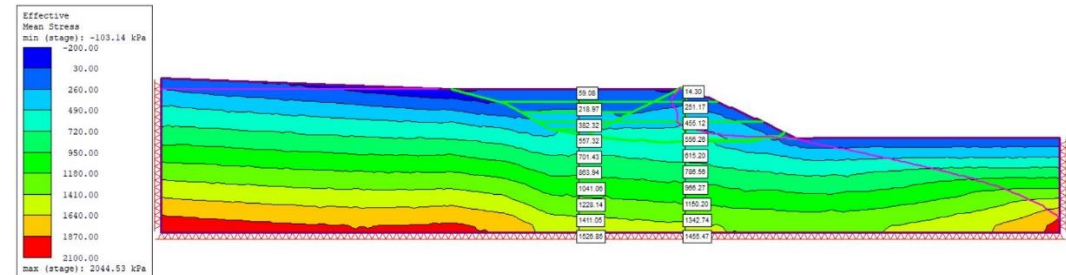


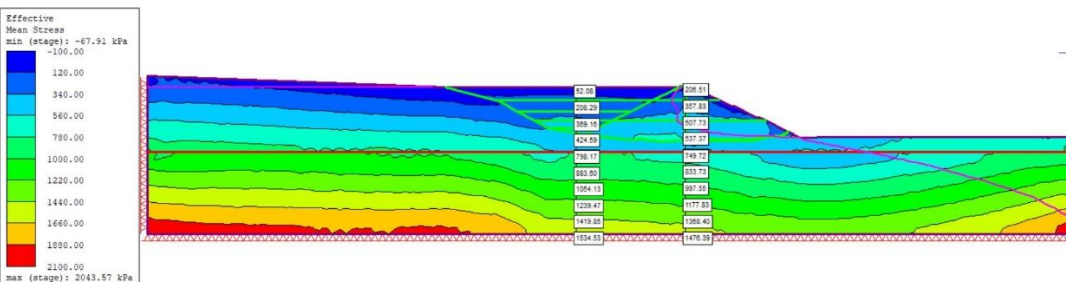
Figura 5. Deslocamento horizontal.

A Figura 6 exibe disposição da tensão efetiva média para os cenários analisados. Pela Figura 6A se observa que no cenário de referência não há concentração de tensão na barragem. A presença de descontinuidade com mergulho horizontal (Figura 6B) altera pouco o perfil de tensão e a presença de descontinuidade com diferentes mergulhos (Figura 6C e D) gera concentração de tensão na região desse elemento no limite do contorno do modelo.

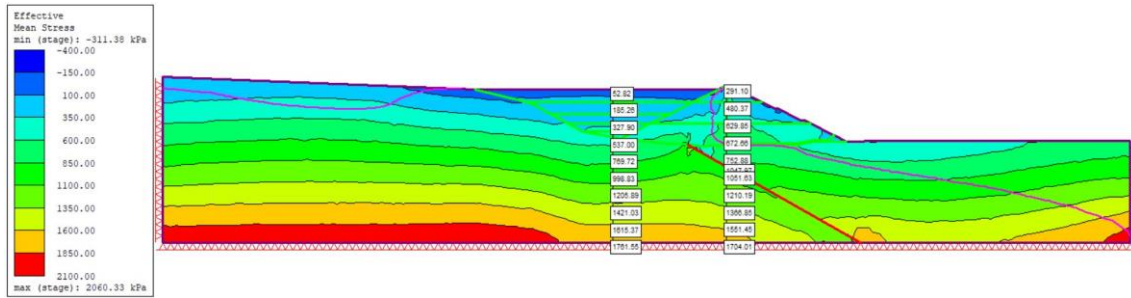
A) Cenário 1



B) Cenário 2



C) Cenário 3



D) Cenário 4

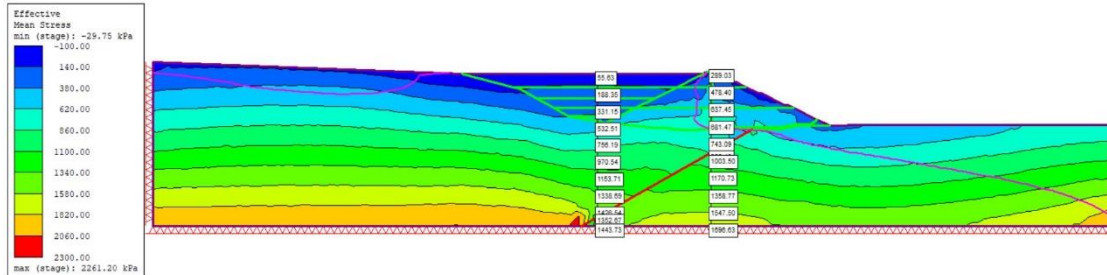
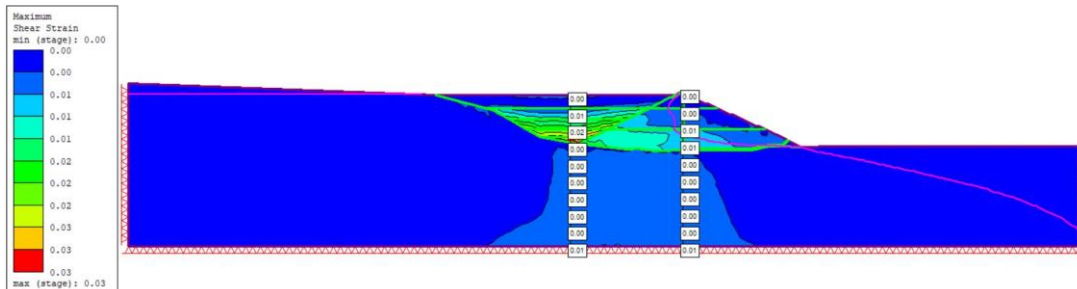


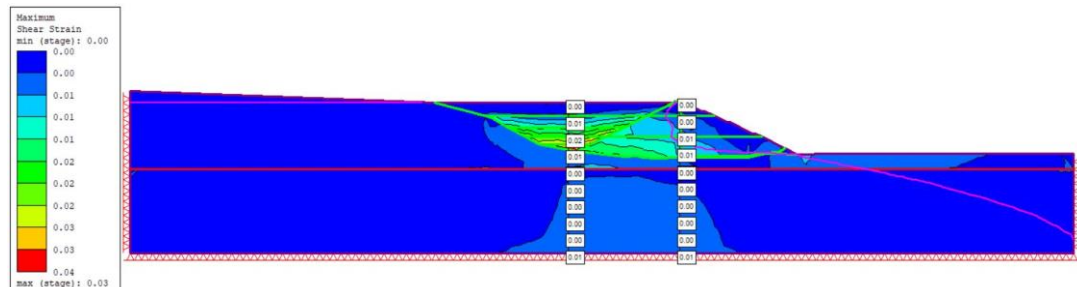
Figura 6. Tensão efetiva média.

Ao analisar a máxima deformação cisalhante (Figura 7) se observa sua concentração no fundo do reservatório em todos os cenários, bem como no contato entre fundação-descontinuidade e aterro da barragem para ambos os cenários (3 e 4) em que a descontinuidade possui mergulho (Figura 7C e D). De acordo com os resultados expostos, a presença de descontinuidade gera uma região de atenção nos espaldares da barragem. No entanto, ressalta-se que os resultados obtidos possuem valores baixos de máxima deformação cisalhante.

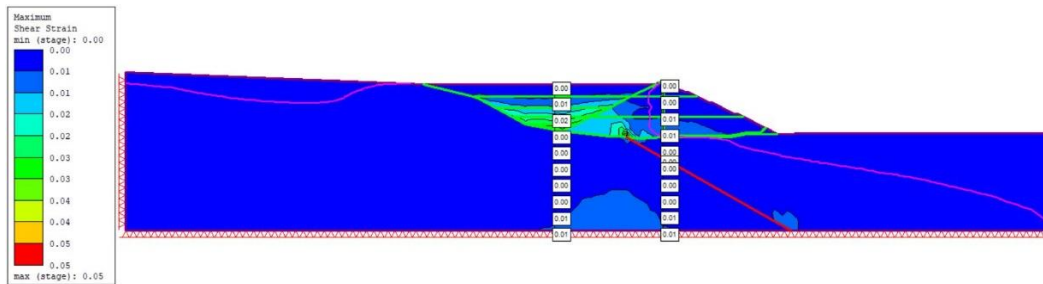
A) Cenário 1



B) Cenário 2



C) Cenário 3



D) Cenário 4

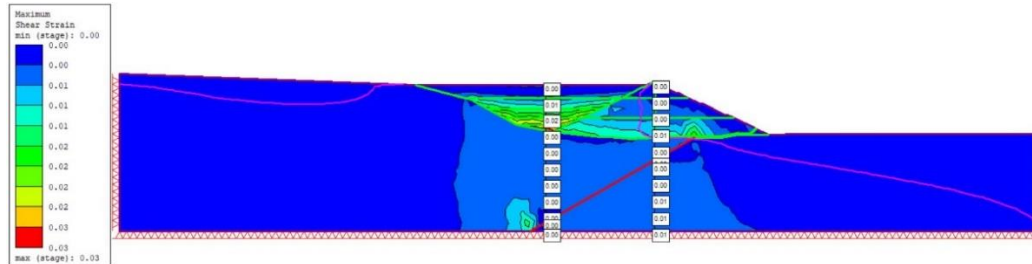


Figura 7. Máxima deformação cisalhante.

4 CONCLUSÃO

A partir do estudo apresentado, nota-se que a presença de descontinuidade, além de sua orientação e mergulho, influencia no comportamento tensão-deformação da barragem. O recalque aumentou com a presença da descontinuidade sendo máximo para o cenário 3 (descontinuidade com mergulho a jusante). O perfil de deslocamento horizontal apresentou grande variação para os cenários analisados, sendo que a presença de descontinuidade gerou concentração do deslocamento horizontal neste elemento, tendendo a ocorrer em sua região central ou a jusante do eixo da barragem e sendo máxima para quando a descontinuidade foi simulada horizontalizada. Em relação à tensão efetiva média, em geral, houve nenhuma ou pouca concentração, ocorrendo maiores valores no contorno final do modelo na presença da descontinuidade com mergulho a montante ou jusante. A máxima tensão cisalhante apresentou concentração em todos os cenários no fundo do reservatório e no contato barragem-fundação nos cenários que a descontinuidade apresentava mergulho a jusante ou montante em relação ao eixo da barragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARTON, N.; BANDIS, S. (1982). Effects of Block Size on the Shear Behaviour of Jointed Rock. Issues in Rock Mechanics. In Proceedings of 23 rd US Symposium of Rock Mechanics (eds RE Goodman & F.E. Heuze), Berkeley, California, pp 739-760.
- BRASIL. Constituição (2020). Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Edição 189. Seção 1.
- MAGALHÃES, Ricardo Aguiar. (2017). Curso sobre utilização do guia de revisão periódica de segurança de barragem e de diretrizes para elaboração de projetos de barragens: manual do empreendedor sobre de segurança de barragens - volumes III e V. Rio de Janeiro. 90 slides, color.
- RS2 ROCSOENCE (2022). User guide: add joint. Disponível em: <https://www.rocsience.com/help/rs2/documentation/rs2-model/boundaries/adding-boundaries/add-joint>. Acesso em: 23/02/2024.
- SOARES, Lindolfo. (2010). Barragem de rejeitos. Comunicação técnica elaborada para o livro tratamento de minérios, 5ª Edição – Capítulo 19 – pág. 831–896. Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França.