

Estudo de Tensão Deformação em uma Barragem em Descaracterização

Augusto Romanini 1

Engenheiro Geotécnico, Mineração Usiminas S.A, Belo Horizonte, Brasil, augusto.romanini@gmail.com

Ian Henrique Pires 2

Engenheiro Geotécnico, Mineração Usiminas S.A, Belo Horizonte, Brasil, ianhpires@gmail.com

RESUMO: Apresenta-se o estudo de tensão deformação em uma estrutura inativa de contenção de rejeitos de mineração. A estrutura é construída em aterro compactado e tem altura de 46,00 m e armazena aproximadamente 8,4 milhões de m³ de rejeito. O projeto de descaracterização é composto de etapas, além do descomissionamento, controle hidráulico e hidrogeológico, estabilidade e monitoramento. O estudo tem como foco a etapa de estabilização a ser executada no projeto. O modelo numérico se baseou na seção principal da estrutura, sendo essa adotada como a seção crítica do referido estudo por apresentar maior altura e pelas características da fundação. A fim de apresentar as deformações esperadas em cada etapa construtiva, a análise foi dividida nas etapas para execução da camada de reforço, sendo uma antes da execução da obra, representando o cenário atual, a segunda considerando o tratamento de fundação e as outras cinco, referentes às etapas de obras até a fase final. As análises foram realizadas com seções estudadas com o *software* PLAXIS 3D – Bentley Systems. Optou-se, então, por utilizar o modelo constitutivo *Hardening Soil* (HS) para as camadas de aluvião e de solos moles, tendo em vista que o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb se torna limitado para caracterização do comportamento desses tipos de materiais, haja visto que eles são suscetíveis a maiores deformações se comparado com as outras unidades geológico-geotécnicas, apresentando alto grau de compressibilidade. Por outro lado, o modelo constitutivo HS permite a descrição não linear do comportamento do solo quando submetido à grandes aplicações de cargas e deformação, levando em consideração o efeito de endurecimento do material, características que melhor representam o comportamento real do material in situ

PALAVRAS-CHAVE: barragem, descaracterização, tensão, deformação, simulação

ABSTRACT: The study of strain stress performed in an inactive structure and used for containment of mining tailings. The structure is built in compacted landfill and has a height of 46.00 m and stores approximately 8.4 million m³ of tailings. The closure project is composed of stages, in addition to decommissioning, of hydraulic and hydrogeological control, stability and monitoring. The study focuses on the stabilization stage to be carried out in the project. The numerical model was based on the main section of the structure, which was adopted as the critical section of the study because of its higher height and the characteristics of the foundation. In order to present the expected deformations in each construction stage, the analysis was divided into the stages for the execution of the reinforcement layer, 1 before the execution of the work, representing the current scenario, one considering the foundation treatment and the other 5, referring to the stages of works until the final phase. The analyses were performed with sections studied using PLAXIS 3D software – Bentley Systems. It was then decided to use the *Hardening Soil* (HS) constitutive model for the alluvial and soft soil layers, considering that the Mohr-Coulomb constitutive model becomes limited to characterize the behavior of these types of materials, since they are susceptible to greater deformations when compared to the other geological-geotechnical units, presenting a high degree of compressibility. On the other hand, the HS constitutive model allows the non-linear description of the behavior of the soil when subjected to large applications of loads and deformation, considering the hardening effect of the material, characteristics that best represent the real behavior of the material in situ

KEYWORDS: dam, closure, stress, deformation, simulation

1 INTRODUÇÃO

A estrutura alvo do estudo está localizada no município de Itatiaiuçu-MG, situado a cerca de 78 km ao sul da cidade de Belo Horizonte e seu acesso, a partir de Belo Horizonte, pela Rodovia BR 381 (sentido São Paulo). Durante sua vida útil a estrutura teve como função principal o armazenamento de rejeitos e recirculação de água. A estrutura foi descomissionada em 26/12/2021, não recebendo mais o aporte de rejeitos. A estrutura tem sua construção iniciada em 2010, por meio de um aterro compactado utilizando materiais argilo-siltosos. A estrutura passou por um alteamento a jusante, também se utilizando de aterro compactado. A configuração atual da estrutura apresenta crista com largura média de 16,0 m e comprimento aproximado de 536,0 m, com altura de 46,0 m. Além disso, a obra de alteamento contou com novo sistema de drenagem interna, composto por tapete drenante e filtro vertical, além do tratamento de fundação com a execução de blocos/enrocamento.

A descaracterização da estrutura será realizada em etapas. Para atender ao projeto de descaracterização, o reservatório deverá ser impermeabilizado, de forma a confinar os rejeitos do ambiente. Após a desativação da barragem, foi proposto um sistema de envelopamento com material argiloso e *topsoil* vegetalizado para revegetação. Sobre essas camadas, deverá ser aplicada uma camada de solo orgânico de 50 cm de espessura para aplicação de proteção vegetal. A proteção vegetal, juntamente com a impermeabilização do reservatório, compõem etapas essenciais para o controle hidrológico e hidrogeológico da estrutura, conforme os critérios para 'Barragem de mineração descaracterizada' da resolução ANM nº 95 de 2022..

Em de acordo com o dimensionamento hidráulico e hidrológico, devem ser executados elementos do sistema de drenagem superficial e de detenção de sedimentos. Os canais de conexão ligarão os *sumps* ao canal de cintura, passando sobre o reservatório. O canal de cintura funcionará como um elemento de drenagem principal, coletando toda a contribuição da área do reservatório e áreas adjacentes. O dimensionamento do canal garante a coleta do escoamento produzido pelas chuvas, já que na configuração final de descaracterização não haverá reservação ou acúmulo de água, nem amortecimento de cheias.

Além disso, será realizada a substituição de solo mole por enrocamento a jusante da barragem. Essa substituição visa aprimorar as características e condições da fundação para a execução do reforço a jusante da estrutura. Na etapa de execução do reforço no talude de jusante, o projeto foi dimensionado com aproximadamente 40,0 m de extensão, com uma inclinação de taludes de 4H:1V. Esses taludes terão em média 5,0 m de altura, com exceção da área de acesso. Essa geometria foi definida considerando a compatibilização dessa camada de reforço com a topografia das ombreiras, buscando integrar o projeto ao encaixe do vale.

Diante desse contexto, os estudos apresentados no presente documento compreendem a realização do estudo tensão *versus* deformação de forma segmentada e sequenciada de acordo com a execução. Dessa maneira, avalia-se a deformação na medida em que o reforço é executado, em cada etapa executiva prevista em projeto, até a finalização e consolidação da camada de reforço da estrutura. Permitindo assim, uma avaliação das deformações ocasionadas pela implantação do reforço a jusante da estrutura e verificação da viabilidade do projeto, de forma a garantir que sua execução atinja os objetivos propostos.

2 METODOLOGIA

2.1 Parâmetros geotécnicos

Inicialmente, foi necessária a avaliação dos ensaios de laboratório a fim de identificar o modelo constitutivo mais adequado para cada material e, assim, definir os parâmetros geotécnicos relevantes para cada modelo constitutivo.

O desenvolvimento deste estudo foi conduzido com o emprego do *software* PLAXIS 3D – Bentley Systems, cujo método de cálculo utilizado foi o de *consolidação*. Esse método permite realizar análises do desenvolvimento de tensões, deformações e dissipação do excesso de poropressão em função do tempo. Em análise prévia, constatou-se que a maioria dos materiais existentes, com exceção do aluvião mole a muito mole e do colúvio, são bem representados pelo modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. O modelo de Mohr-Coulomb é relativamente mais simples, por considerar que o material tem comportamento linear elástico perfeitamente plástico. Por esta razão, o modelo exige menor quantidade de parâmetros de entrada, e os parâmetros básicos são o Módulo de Elasticidade (E) e Coeficiente de Poisson (ν).

O Módulo de Elasticidade é a propriedade mecânica que mede a rigidez dos materiais e define a relação tensão-deformação dos mesmos. É considerado pelo modelo constitutivo de Mohr-Coulomb como valor fixo, mas no caso de comportamento real dos solos o seu valor varia de acordo com o nível de tensão a qual o solo está submetido. O Coeficiente de Poisson (ν) é um valor adimensional que relaciona as deformações em duas dimensões de um material isotrópico e homogêneo. O *Hardening Soil (HS)* é um modelo constitutivo não linear hiperbólico, e considera que o solo apresenta um comportamento dependente do nível de tensão confinante ao qual está submetido, resultando em aumento da rigidez e, conseqüentemente, deformações mais realistas.

Optou-se, então, por utilizar o modelo constitutivo *Hardening Soil* para as camadas de aluvião e de solos moles, tendo em vista que o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb se torna limitado para caracterização do comportamento desses tipos de materiais, haja vista que eles são suscetíveis a maiores deformações se comparado com as outras unidades geológico-geotécnicas, apresentando alto grau de compressibilidade. Por outro lado, o modelo constitutivo *HS* permite a descrição não linear do comportamento do solo quando submetido à grandes aplicações de cargas e deformação, levando em consideração o efeito de endurecimento do material, características que melhor representam o comportamento real do material in situ.

A definição dos módulos de elasticidade dos materiais existentes, ocorreu através da interpretação dos ensaios triaxiais realizados no plano de investigação do projeto de caracterização. Considerando o modelo de Mohr-Coulomb, a partir do gráfico tensão-deformação dos ensaios triaxiais encontrou-se o valor de E correspondente a cada tensão ensaiada, conforme apresentado na Figura 1.

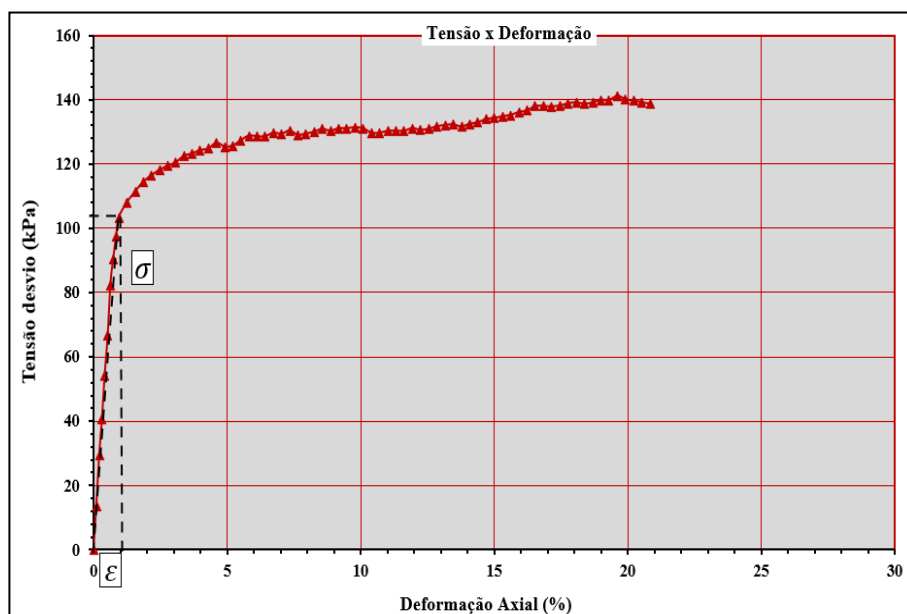


Figura 1. Módulo de elasticidade a partir do gráfico Tensão x Deformação
Fonte: Ensaio CIUSat – 8203 (adaptado)

Após a análise gráfica, foi utilizada a Equação 1 para o cálculo do módulo de elasticidade, com base nas tensões e deformações obtidas. Foi adotada a média dos resultados encontrados em cada ensaio para a definição do módulo de elasticidade de cada material. As equações abaixo são derivadas da Lei de Hooke.

$$E = \sigma / \epsilon \quad (1)$$

O coeficiente de Poisson foi determinado pela relação elástica ilustrada na Equação 2.

$$\nu = K0 / (1+K0) \quad (2)$$

O empuxo no repouso (K_0) foi determinado com base nos ângulos de atrito efetivos dos materiais, A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a relação utilizada, proposta por Jaky (1944), para a estimativa do empuxo no repouso.

$$V = 1 - \sin \theta' \quad (3)$$

O modelo construtivo escolhido para o aluvião muito mole a mole e o colúvio é o *Hardening Soil*, seguindo as orientações do manual *Plaxis*, levando em consideração que os solos moles apresentam comportamento muito compressível que não é bem representado através do modelo de Mohr-Coulomb, que estuda o comportamento elástico perfeitamente plástico.

Desta forma, os parâmetros de entrada para o *Hardening Soil* são:

- Parâmetros de rigidez:

- E_{50}^{ref} : Rigidez secante em ensaio triaxial drenado padrão (pode ser considerado $E_{50}^{ref} \cong 1 \cdot E_{oed}^{ref}$);
- E_{oed}^{ref} : Rigidez de recompressão/descarregamento (por padrão $E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref}$);
- m : expoente de dependência entre rigidez e níveis de tensão. Para solos moles é realístico usar valores de $m=1$.

- Parâmetros de ruptura (baseados em Mohr-Coulomb):

- c : coesão efetiva;
- Φ : ângulo de atrito efetivo;
- Ψ : ângulo de dilatância.

A definição dos módulos de elasticidade do rejeito e colúvio foi obtido a partir do gráfico de tensão-deformação do ensaio triaxial, encontrou-se os valores de E_{50} correspondente a cada tensão ensaiada. Em seguida, plotou-se esse par de pontos em um gráfico logarítmico, sendo traçada uma linha interligando os pontos, utilizando como referência o manual do software *Plaxis*. A partir da inserção do E_{50}^{ref} os demais módulos de elasticidade são calculados.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros de rigidez para o modelo de Mohr-Coulomb, e a Tabela 2 os parâmetros para o modelo *Hardening Soil*, ambos após interpretação dos ensaios triaxiais e de adensamento.

Tabela 1. Parâmetros de rigidez dos materiais – Mohr-Coulomb











Material	Cor	E' (MPa)	ν
Aterro - Maciço inicial		37,25	0,32
Aterro - Alçamento do maciço		30,28	0,34
Rejeito		1,00	0,33
Fundação - Solo Residual de Xisto Nova Lima		25,69	0,32
Fundação - Saprolito de Xisto Nova Lima		118,00	0,24
Enrocamento		60,00	0,33
Aluvião Médio a Rijo		20,00	0,36
Estéril (Reforço)		60,00	0,33

Tabela 2. Parâmetros de rigidez dos materiais – Hardening Soil

Material	Cor	E'50	E _{oed}	E _{ur}	ν_{ur}
Aluvião Mole a Muito Mole		2000	2000	6000	0,2
Colúvio		5000	5000	15000	0,2

2.1 Estudo de Tensão Deformação

O estudo de tensão deformação mostra-se necessário devido ao aumento das tensões com a construção do reforço a jusante da estrutura. A análise permitiu avaliar o comportamento das camadas frente à construção do reforço, especialmente do aluvião mole e do colúvio, materiais menos competentes localizados a jusante da estrutura e na ombreira esquerda, respectivamente.

Em consonância com à premissa do projeto, a proposta de descaracterização da estrutura não contempla a remoção total do material de baixa capacidade de suporte, mas sim aliviado pela geometria suave. Dessa forma, o tratamento da fundação consiste na remoção parcial do material localizado a jusante da estrutura. Espera-se deslocamentos mais expressivos nessa região, considerando que os materiais moles são mais compressíveis do que os materiais mais competentes. As seções críticas são aquelas que apresentam esses materiais. Portanto, é necessário avaliar o comportamento do barramento diante do aumento do peso em seu talude de jusante, onde ocorrerá um significativo aumento das tensões confinantes.

O estudo de tensão deformação consiste na simulação do comportamento do maciço, estimando as tensões e deformações que ocorrerão na estrutura. Isso possibilita a identificação de possíveis excessos que possam influenciar na segurança da barragem. Esse tipo de análise é importante para avaliar estruturas altas, faseadas ou aquelas sujeitas a tensões muito grandes. Recomenda-se que essas análises sejam realizadas em conjunto com análises de equilíbrio limite para um melhor entendimento das tensões e sua influência na segurança da estrutura.

A partir do modelo numérico, é possível realizar previsões quantitativas de deslocamentos causadas por aplicação de cargas estática ou dinâmicas, cuja precisão dos resultados é dependente do nível de simplificação da geometria, da aproximação dos parâmetros reais dos materiais e das condições de contorno. As análises apresentadas foram realizadas com intuito de avaliar a deformação ocasionada pela construção do reforço para a descaracterização da estrutura, e visa avaliar o impacto do trânsito de equipamento nas camadas presentes na região afetada pela descaracterização.

As análises tensão deformação foram avaliadas utilizando o *software* PLAXIS 3D, da Bentley Systems. O estudo considera: i) análise apenas na seção principal da estrutura; ii) materiais isotrópicos e homogêneos, iii) modelo construtivo simplificado, utilizando o modelo de Mohr-Coulomb para os materiais que apresentem parâmetros de rigidez superiores a 5 MPa; iv) Modelo construtivo avançado, utilizando o modelo *Hardening Soil* para os materiais que apresentem parâmetros de rigidez inferiores a 5 MPa; v) Adoção de linha freática em cota fixa no reservatório na cota 973 m, passando pelo sistema de drenagem interna do barramento e contato do reforço com a fundação e vi) malha formada por elementos triangulares.

Analisaram-se seis cenários para verificar os deslocamentos durante as obras e após a sua conclusão, os quais são apresentados na Tabela 3. Ressalta-se que os períodos adotados para cada fase da construção foram baseados no cronograma de descaracterização da estrutura disponibilizado. Além disso, também foram realizadas análises que contemplam períodos posteriores à descaracterização da estrutura. Contudo, notou-se que as deformações significativas se restringem ao período de construção do reforço, sendo esse o foco do estudo. A seção de análise desse estudo é apresentada na Figura 2.

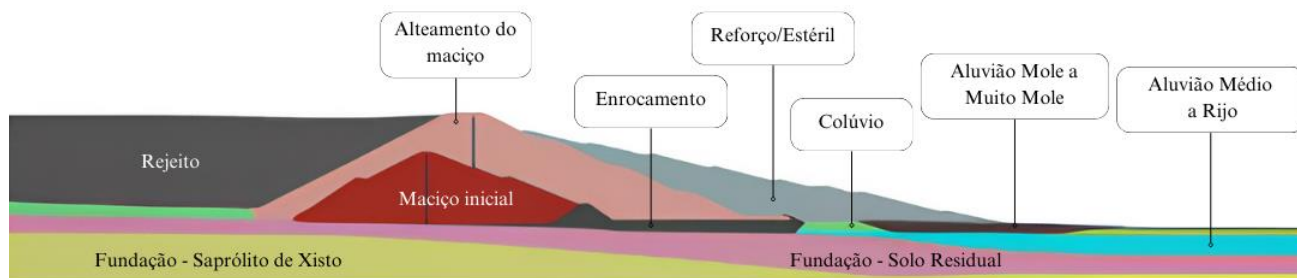
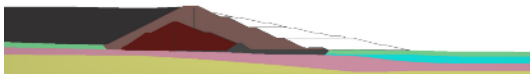

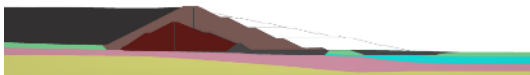






Figura 2. Seção AA' – Etapa final

Tabela 3. Cenários Analisados

Etapa		Descrição
Etapa 1: Condição atual	]Situação anterior a execução do reforço da fundação e da estrutura da barragem
Etapa 2: Escavação para reforço da fundação		Escavação para retirada de solo mole, provocando alívio de tensões (execução em 120 dias)
Etapa 2: Implantação do reforço da fundação		Execução de enrocamento em substituição ao solo mole retirado, acréscimo de tensão (execução em 120 dias)
Etapa 3: Alçamento do reforço do maciço 1		Execução de aterro de alçamento do reforço fase 1, acréscimo de tensão (execução em 64 dias)
Etapa 4: Alçamento do reforço do maciço 2		Execução de aterro de alçamento do reforço fase 2, acréscimo de tensão (execução em 32 dias)
Etapa 5: Alçamento do reforço do maciço 3		Execução de aterro de alçamento do reforço fase 3, acréscimo de tensão (execução em 16 dias)
Etapa 6: Alçamento do reforço do maciço 4		Execução de aterro de alçamento do reforço fase 4, acréscimo de tensão (execução em 4 dias)

3 RESULTADOS

A seção AA' está localizada no eixo central da estrutura e é considerada a mais crítica para a viabilidade do projeto. Essa seção abrange todas as fases previstas para a descaracterização da barragem, incluindo a escavação para o tratamento da fundação, o próprio tratamento da fundação e as quatro fases de construção do reforço. Além disso, em sua configuração final, ainda está presente uma camada remanescente de aluvião mole, que é o material com menor resistência à compressão em comparação com os demais da fundação. A Figura 3 apresenta os deslocamentos calculados após a escavação do local para o posterior tratamento da fundação.

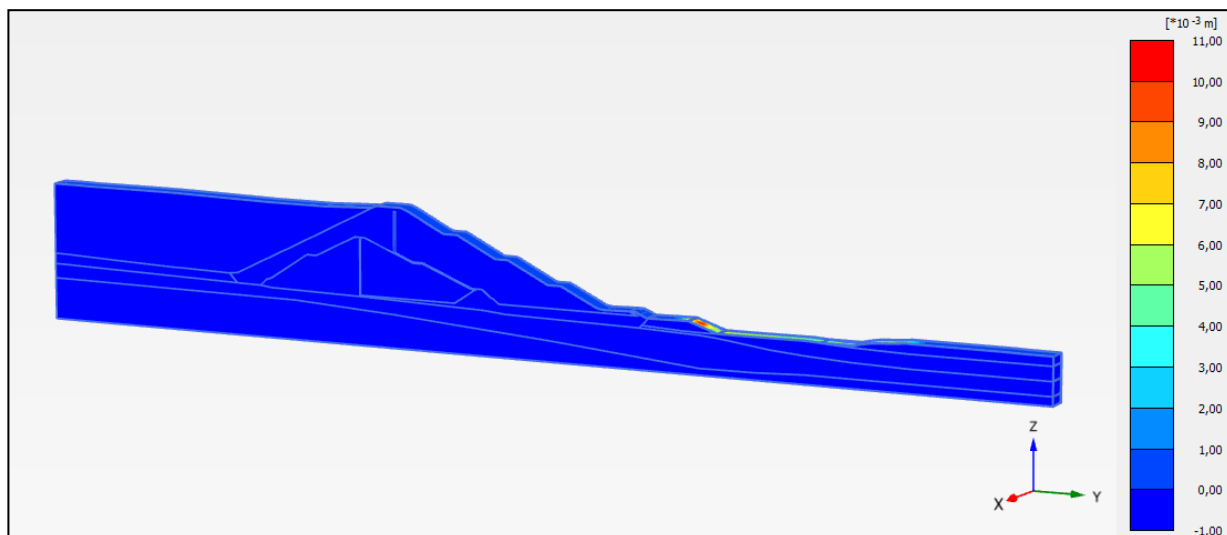


Figura 3. Seção AA' – Deformação total (m) – Etapa de escavação para tratamento da fundação.

Os deslocamentos causados pela escavação para tratamento de fundação ficaram próximos de 0,01 m, conforme apresentado na Figura 3. Dessa forma, os resultados mostram que a retirada de material a jusante da estrutura não tem influência na estabilidade do barramento, uma vez que as movimentações se restringem ao local de retirada de material.

A Figura 4 apresenta os deslocamentos após a conclusão de todas as etapas de descaracterização da estrutura.

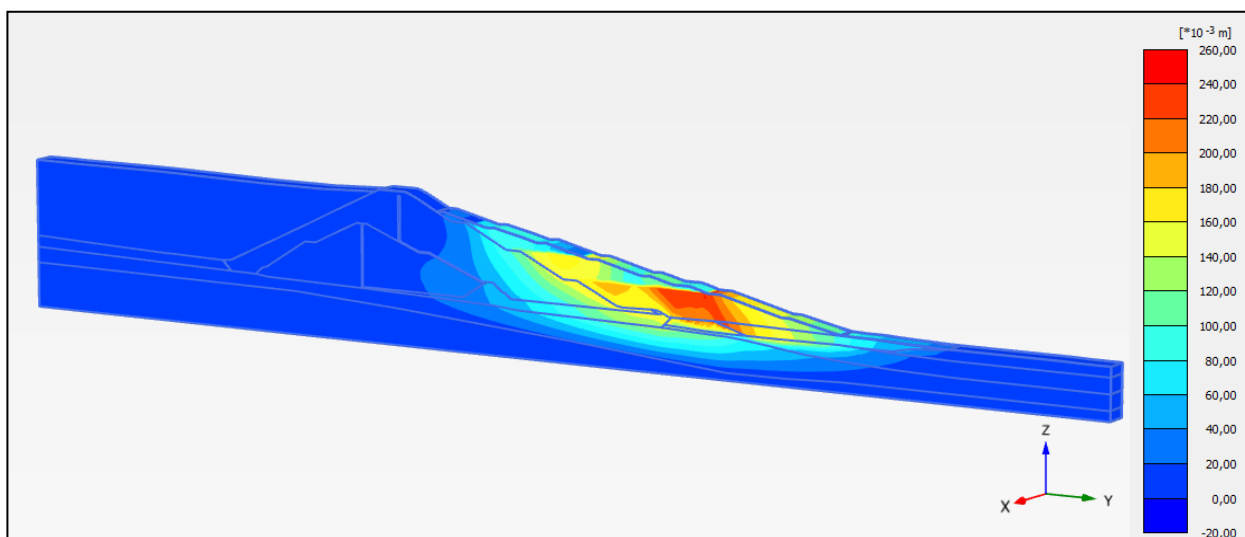


Figura 4. Seção A-A' – Deformação total (m) – Quarta etapa do alteamento do reforço em estéril.

Os maiores deslocamentos estão concentrados no reforço construído e na camada remanescente do aluvião mole, cujo valor máximo é de 0,25 m, sendo 0,25 m na vertical e 0,17 m na horizontal, conforme apresentado na Figura 4. Além disso, é possível visualizar que os deslocamentos no barramento são, em sua maioria, inferiores à 0,10 m. Por fim, relacionado aos deslocamentos totais, nota-se que as maiores movimentações ocorrem nas fases iniciais de alteamento do reforço, fato decorrente do maior volume de material disposto na primeira e segunda fase.

O resultado apresenta-se dentro do esperado, considerando que o estéril e o aluvião mole foram as camadas que apresentaram maiores deslocamentos, devido ao alto índice de vazios e a alta taxa de compressibilidade, respectivamente. Ademais, relacionado à tensão vertical efetiva o barramento está submetido a tensões não maiores que 42 MPa, e o contato do reforço com a fundação o maior valor calculado é de 31 MPa. A Tabela 4 apresenta os resultados para a seção A-A da estrutura.

Tabela 4. Resultados dos deslocamentos totais, verticais e horizontais do faseamento da construção

Seção	Etapa	A-A'
Deformação Total (m)	Escavação para tratamento da fundação	0,010
	Implantação do tratamento da fundação	0,020
	1ª Etapa de alteamento do reforço	0,200
	2ª Etapa de alteamento do reforço	0,230
	3ª Etapa de alteamento do reforço	0,240
Deformação em Z - Vertical (m)	4ª Etapa de alteamento do reforço	0,240
	1ª Etapa de alteamento do reforço	0,200
	2ª Etapa de alteamento do reforço	0,220
	3ª Etapa de alteamento do reforço	0,220
Deformação em Y - Horizontal (m)	4ª Etapa de alteamento do reforço	0,220
	1ª Etapa de alteamento do reforço	0,100
	2ª Etapa de alteamento do reforço	0,180
	3ª Etapa de alteamento do reforço	0,190
	4ª Etapa de alteamento do reforço	0,190

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados obtidos dos ensaios de laboratório disponibilizados, foi realizada a interpretação dos resultados dos ensaios de caracterização, adensamento e triaxiais dos materiais que compõem o barramento e sua fundação. Para este estudo, foram utilizados dois modelos constitutivos para caracterizar os materiais: elasto-plástico perfeito e *Hardening Soil*.

O modelo constitutivo *Hardening Soil* foi aplicado à caracterização do aluvião mole e do colúvio, pois estes materiais apresentam alto índice de compressibilidade e são mais adequadamente representados por este modelo. Já para os demais materiais, foi utilizado o modelo constitutivo elasto-plástico perfeito (Mohr-Coulomb).

Os resultados indicam que os deslocamentos horizontais e verticais observados são relativamente pequenos em comparação com as dimensões do barramento, reforço e unidades litológicas da região. Além disso, a implantação do reforço no talude de jusante da estrutura não causou grandes deformações no barramento, o que permite concluir que as obras de descaracterização não afetam negativamente a estabilidade da estrutura.

Ademais, o tratamento de fundação aplicado mostrou-se adequado e reduziu significativamente os deslocamentos previstos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Mineração Usiminas S.A e a Diretoria de Desenvolvimento de Projetos Estratégicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARDET, J.P.. Experimental soil mechanics. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1997.
- BENTLEY SYSTEMS. PLAXIS 3D (2023): Reference Manual. Bentley Systems, 646 pág.
- DA CRUZ, P. T.. 100 Barragens Brasileiras. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 610 p.
- LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V.. Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1969.
- MOREIRA, L.. Análise de Deformação de uma Barragem de Terra Instrumentada Com o Uso de Dois Modelos Constitutivos. Dissertação (Mestrado) - Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2012.