

Regras de Ouro em Análises Tensão-Deformação: Princípios Essenciais para uma Avaliação

Mariana Alvarenga Ruas e Silva

Engenheira Geotécnica, Pimenta de Ávila, Nova Lima, Brasil, mariana.alvarenga@pimentadeavila.com.br

Aryane Silva Carvalho

Engenheira Civil, Pimenta de Ávila, Nova Lima, Brasil, aryanecarvalho@pimentadeavila.com.br

Jéssica Pereira Duarte

Engenheira Geotécnica, Pimenta de Ávila, Nova Lima, Brasil, jessica.duarte@pimentadeavila.com.br

Juliana Santos Fabre

Engenheira Geotécnica, Pimenta de Ávila, Nova Lima, Brasil, juliana.fabre@pimentadeavila.com.br

RESUMO: As análises do tipo tensão-deformação permitem a previsão da reação dos solos a forças externas, variando as tensões aplicadas e obtendo deformações resultantes dos carregamentos aplicados. Os modelos constitutivos, utilizados para tais análises, levam em consideração diversas propriedades dos solos, como a compressibilidade/deformabilidade e a resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito interno). Esse conjunto de parâmetros permite que sejam realizadas análises para projetar estruturas seguras, avaliando riscos geotécnicos e prevendo deformações e recalques. Existe atualmente no mercado softwares comerciais que auxiliam nos cálculos e interpretações dos comportamentos das deformações associadas à estabilidade. A diversidade de programas frequentemente desafia os engenheiros na escolha do mais apropriado para suas necessidades específicas. Além disso, a ausência de conteúdos especializados que ofereçam orientação clara na utilização dessas ferramentas de modelagem numérica representa certa dificuldade para alguns profissionais da geotecnia. Muitas vezes, a complexidade dessas ferramentas exige uma curva de aprendizado substancial, e a carência de recursos educativos específicos pode dificultar a compreensão detalhada de suas funcionalidades. Desta forma, o presente estudo tem como objetivo apresentar a aplicação de uma modelagem por elementos finitos com a utilização do software RS2 desenvolvido pela Rocscience pelo modelo constitutivo de Mohr Coulomb, possibilitando a interpretação dos resultados de deslocamento.

PALAVRAS-CHAVE: Tensão-deformação, Modelagem Por Elementos Finitos, Software RS2, Estabilidade de Barragens.

ABSTRACT: The Stress-strain analyses allow the prediction of soil response to external forces, varying the applied stresses and obtaining resulting deformations from the applied loadings. The constitutive models, used for such analyses, consider various soil properties, such as compressibility/deformability and shear strength (cohesion and internal friction angle). This set of parameters enables analyses to be conducted to design safe structures, evaluate geotechnical risks, and predict deformations and settlements. There are currently commercial software packages available on the market that assist in the calculations and interpretations of deformation behaviors associated with stability. The diversity of programs often challenges engineers in choosing the most appropriate one for their specific needs. Furthermore, the lack of specialized content providing clear guidance on the use of software for numerical modeling represents a significant challenge for some geotechnical professionals. Often, the complexity of these tools requires a substantial learning curve, and the shortage of specific educational resources can hinder a detailed understanding of their functionalities. Therefore, this study aims to present the application of finite element modeling using the RS2 software developed by Rocscience with the Mohr-Coulomb constitutive model, enabling the interpretation of the displacement results.

KEYWORDS: Stress-strain, Finite Element Modeling, RS2 Software, Dam Stability.

1 INTRODUÇÃO

Considera-se que os solos são classificados em dois grupos de deformação, sendo volumétricas ou de compressão e, as deformações de forma ou distorções. Um fenômeno que exemplifica essa ocorrência é o adensamento unidimensional, causado por uma redução de volume do solo em consequência da saída gradual da parcela de água em sua estrutura. (Bernardo et al. 2020).

Outra reação dos solos, os chamados recalques, são categorizados por Marangon (2018) como recalque inicial, aquele que ocorre em solos saturados com a possibilidade de ocorrência de deformações horizontais e verticais; recalque por consolidação primária ou de adensamento, aquele que acontece quando há transferência dos esforços entre água e sólido, com a eliminação de água, e; adensamento secundário, o que acontece após o adensamento primário e também é conhecido como fluência.

Ainda no que diz respeito ao comportamento dos solos, as movimentações sem grande expressividade são previstas, e como citado previamente, no que diz respeito as obras geotécnicas, estes fenômenos são causados pela expulsão de vazios dos solos, seja por compactação ou por adensamento dos materiais.

Considerando essas movimentações previstas, os modelos constitutivos foram desenvolvidos para descrever matematicamente o comportamento dos materiais, incluindo o comportamento tensão-deformação. Neste estudo, será apresentada a aplicação do modelo constitutivo elástico linear de Mohr-Coulomb, cuja relação tensão-deformação se apresenta na Figura 1.

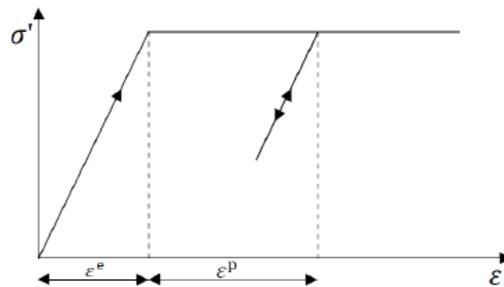


Figura 1. Modelo de relação tensão-deformação de Mohr-Coulomb.
Fonte: Brinkgreve et al., 2014.

Os critérios de ruptura deste modelo são definidos pelas seguintes equações:

$$\tau = c' + \sigma_n \tan(\varphi) \quad (1)$$

Onde:

τ é a tensão normal total no material;

c' é a coesão aparente do solo (ou resistência ao cisalhamento em tensão nula);

σ_n é a tensão normal efetiva (diferença entre a tensão total e a pressão da água);

φ (phi) é o ângulo de atrito ao cisalhamento, que é a medida da resistência do solo ao cisalhamento (propriedade intrínseca do material e expressa em graus).

Para utilização da equação em tensões normais, Coulomb posteriormente desenvolveu a equação:

$$\sigma_1 (1 - \sin(\varphi)) - \sigma_3 (1 + \sin(\varphi)) - 2c' \cos(\varphi) = 0 \quad (2)$$

Onde:

φ (phi) é o ângulo de atrito interno.

c' é a coesão aparente do solo.

Para realizar uma modelagem seguindo o modelo de Mohr-Coulomb, é necessário obter dois parâmetros elásticos: o módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν). Ambos os coeficientes, podem ser obtidos através de resultados de ensaios triaxiais drenados ou de compressão simples.

O módulo de Young (E) representa a relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante (alteração na forma do material por unidade de comprimento), na região elástica do material.

O coeficiente de Poisson (ν), indica como o material se deforma sob tensão. É uma propriedade do material que descreve a relação entre a deformação lateral e a deformação axial de um material quando ele é submetido a uma carga uniaxial e pode ser obtido através da relação:

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\varepsilon_{\text{vol}}}{\varepsilon_1} \right) \quad (3)$$

Onde:

ε_{vol} é a deformação volumétrica;

ε_1 é a deformação na direção principal maior, normalmente a deformação axial.

Arelado ao comportamento dos materiais, a instalação e o monitoramento de dispositivos de instrumentação em estruturas geotécnicas permite avaliar suas performances, verificando resultados de desempenho como deslocamentos, vazões, tensões, inclinações, entre outros. Como exemplo de aplicação, Silva et al. (2022) discutem a aplicação do histórico de monitoramento geotécnico como alternativa para, por meio de retroanálise, calibrar o comportamento tensão-deformação esperado para uma estrutura geotécnica.

2 METODOLOGIA

O objetivo deste artigo é apresentar, de forma prática, a aplicação de regras de ouro para realização de modelagem por elementos finitos em barragens. Serão abordados os principais passos e considerações envolvidos no processo de modelagem, incluindo os dados a serem incorporados e a análise dos resultados. Além disso, serão discutidas as vantagens e desafios associados à calibração de instrumentos de deformação no software, a importância de ajustes para correção de erros no modelo e, obtenção de resultados confiáveis em análises de tensão-deformação de barragens.

Para tal avaliação, foi desenvolvido o modelo de duas barragens hipotéticas, sendo a primeira de aterro compactado (Figura.2A) com aproximadamente 7 metros de altura e a segunda de núcleo argiloso e espaldares de enrocamento (Figura.2B). Ambas com a presença de tapete drenante, apoiadas sob fundação rochosa e com a finalidade de contenção de rejeitos de minério de ferro. Além disso, como instrumentação o modelo possui uma régua linimétrica, instalada na região do reservatório, e um marco topográfico, conforme apresentado na Figura 2.

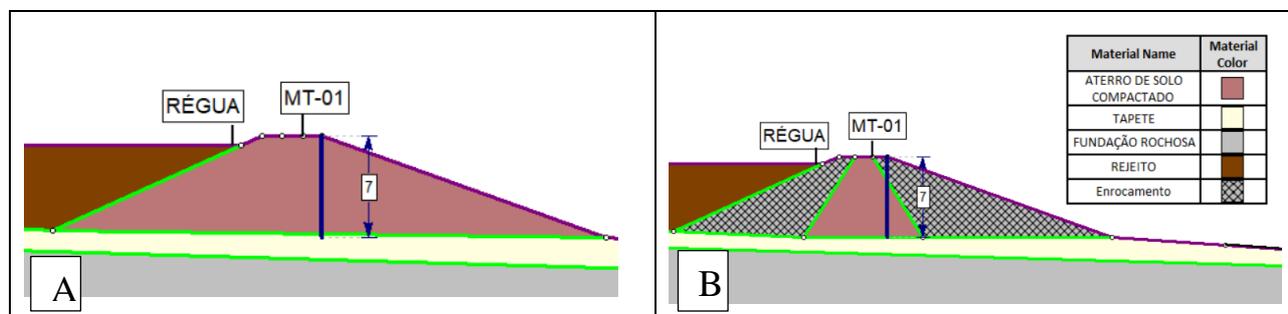


Figura 2. Representação do modelo de barragem proposto.

Fonte: das autoras.

3 MODELAGEM

No que diz respeito as etapas-chave para a elaboração de uma modelagem por elementos finitos, antes de iniciar o processo de modelagem de uma estrutura geotécnica, é imprescindível inserir os dados relativos a cada material a ser analisado, visando caracterizar o comportamento tensão-deformação. Para isso, é necessário realizar previamente ensaios de caracterização para determinar os parâmetros físicos, ensaios de permeabilidade in situ ou em laboratório para incorporar os dados necessários, bem como ensaios de resistência

para obter informações sobre as propriedades mecânicas. Adicionalmente, devem ser realizadas os ensaios de deformabilidade para compreender a resposta dos materiais a diferentes níveis de tensão e deformação.

3.3 Criação da malha

Após definir a geometria, estabelecer os horizontes de cada material e inserir os parâmetros dos materiais componentes da estrutura, o próximo passo é aplicar a malha na modelagem. Essa etapa é importante para discretizar a geometria do sistema em estudo, tornando o modelo mais adaptado às análises numéricas.

A subdivisão em triângulos, quadriláteros, tetraedros ou hexaedros simplifica o sistema modelado. Em seguida são atribuídas propriedades aos elementos e aplicadas equações que descrevem o comportamento físico do sistema através de resolução numérica.

Para os modelos tratados neste estudo, a malha foi projetada ao longo de toda a seção e concentrada nas regiões mais sensíveis e de maior interesse. Dado o objetivo de analisar as condições do maciço, optou-se por uma resolução mais alta nesta região, aumentando o número de pontos de dados no local de interesse e proporcionando uma análise mais precisa, especialmente em áreas com mudanças rápidas ou abruptas nas propriedades. Conforme apresentado na Figura 3.

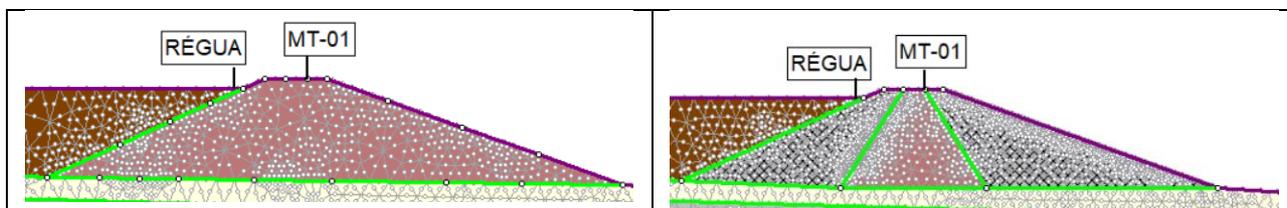


Figura 3. Representação da densidade da malha de pontos nas regiões dos maciços.

Fonte: das autoras.

Nesta etapa, é fundamental ser sensível ao nível de detalhamento das malhas, pois malhas mais densas implicam em maior esforço computacional. Recomenda-se avaliar gradualmente o aumento da densidade e determinar quanto este aumento é significativo para os resultados das análises.

Durante esta fase, é comum que surjam alguns problemas, como a geração de elementos invertidos, elementos com comprimentos excessivamente longos em relação uns aos outros e a sobreposição de nós em regiões com geometria muito delgada. Para auxiliar na identificação e correção desses possíveis erros, o software disponibiliza uma ferramenta que permite ao usuário visualizar a qualidade da malha, inclusive destacando esses problemas (Figura 4). Essa etapa é essencial para garantir que o modelo seja executado sem falhas e não apresente problemas de convergência.

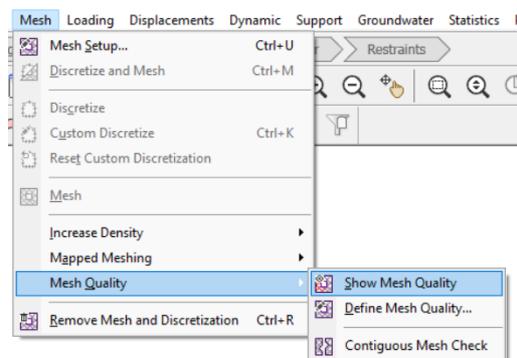


Figura 4. Ferramenta “Show Mesh Quality”.

Fonte: das autoras.

3.1 Limites de fronteira e condições de contorno

Devido à propagação dos efeitos das condições de fronteira próximas da estrutura modelada para o interior do modelo, com alto potencial de impacto na resposta global e ocorrência de distorções ou reflexões

indesejadas das ondas de tensão e deformação, um princípio fundamental na realização de modelagem numérica é o ajuste dos limites de fronteira.

Para os casos específicos dos modelos em estudo, o engenheiro encarregado da modelagem deve considerar que cada modelo apresentará características únicas quanto à distância dos limites de fronteira. Como boa prática, assim como na primeira regra de ouro, é essencial exercitar sensibilidade através de um aumento gradual dos limites de fronteira até que não sejam observadas alterações expressivas nas respostas da modelagem e não surjam distorções indesejadas no modelo.

As barragens analisadas tem como finalidade a contenção de rejeitos, e seu modelo prévio indicava uma geometria muito aproximada do objeto em estudo (barramento), não permitindo uma visualização abrangente do reservatório e da região de jusante. Portanto, para correção de seus limites obteve-se fronteiras de aproximadamente 35 m, o que representou limites compatíveis com a regra de ouro citada. A Figura 5 apresentam as condições de fronteira que foram adotadas para as duas seções hipotéticas objetos deste estudo

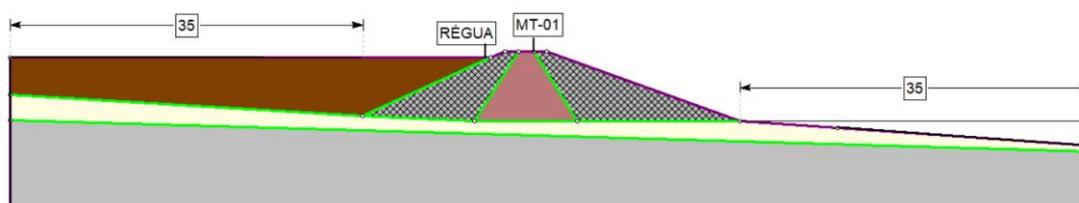


Figura 5. Representação das fronteiras do modelo.

Fonte: das autoras.

3.2 Condições de contorno

Antes de realizar uma modelagem numérica do comportamento de uma barragem, é essencial compreender como a estrutura está se comportando atualmente ou como se espera que ela se comporte. Isso inclui entender as condições de fluxo, a capacidade de suporte, as características de permeabilidade dos materiais, e como a estrutura irá se deformar ao longo do tempo. Todas essas características estão diretamente ligadas às propriedades dos materiais obtidas por meio de ensaios de campo ou laboratório, bem como às respostas dos instrumentos de monitoramento instalados na barragem.

Com esse conhecimento em mãos, ao realizar a modelagem, deve-se inserir essas informações no software, estas são as chamadas “condições de contorno”. No caso dos modelos em questão, as condições de contorno incluem restrições de movimento nos eixos X e Y nas extremidades, permitindo movimentações apenas nas áreas de interesse, a Figura 6 apresenta a condição de deslocamento adotada para os modelos. Além disso, para as condições de fluxo, os níveis d'água de montante são considerados com base nas leituras da régua linimétrica, já para o nível de jusante foi indicada condição de saída do fluxo próximo a superfície, a Figura 7 apresenta a condição de fluxo adotada para os modelos.

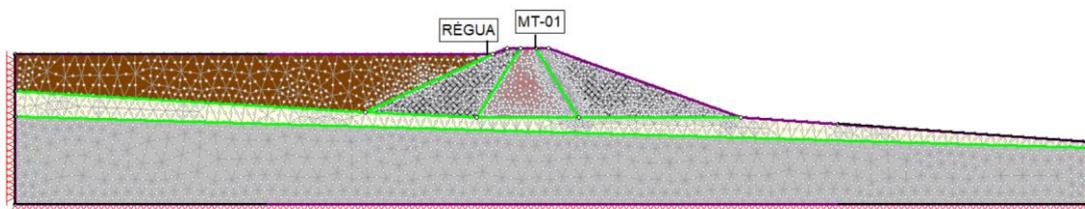


Figura 6. Condições de contorno de deslocamento.

Fonte: das autoras.

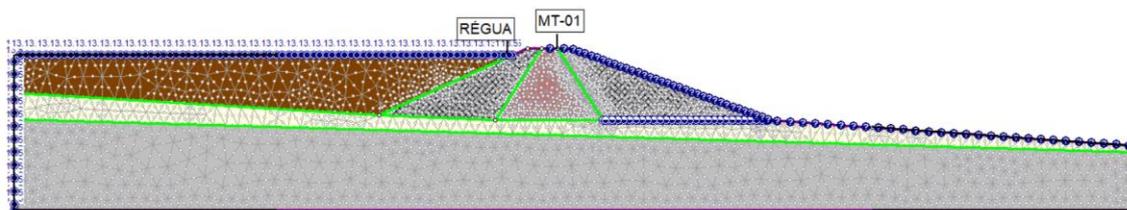


Figura 7. Condições de contorno de fluxo.
Fonte: das autoras.

3.4 Criação de etapas de análise

A fase de criação de etapas na modelagem é implantada para variar as condições ao longo do tempo ou de forma sequencial. Essa prática permite simular uma variedade de cenários dinâmicos, como escavações, construções ou mudanças nas condições de contorno ao longo do tempo.

Por exemplo, as etapas podem ser usadas para representar progressivamente evoluções construtivas ou de escavação. Além disso, podem ser aplicadas para modelar variações sazonais, como mudanças climáticas ao longo do ano. Também são úteis para simular atividades dinâmicas ou eventos transitórios, como passagem de veículos, carregamento temporário ou movimentos de solo, em diferentes momentos durante a análise. Outro uso é para a estabilização de fluxo, permitindo modelar o comportamento da estrutura ao longo do tempo após mudanças nas condições de contorno de percolação. As etapas podem possuir intervalos de segundos, minutos, horas, dias, meses ou anos entre si.

Para os modelos simulados, foram estabelecidas duas etapas distintas. Na primeira etapa, representa-se o marco zero após a conclusão da obra de construção, sem o enchimento do reservatório. Na etapa seguinte, é considerado o enchimento do reservatório. Entre essas duas etapas, foi aplicado um intervalo de seis meses, destinado à estabilização do fluxo interno, dissipação das poropressões e ao aumento gradual do nível freático. Essas etapas permitem simular o comportamento dinâmico da estrutura ao longo do tempo.

3.3 Sequência de calibração dos instrumentos

A sequência, para calibração dos instrumentos em um modelo numérico de tensão-deformação deve-se seguir uma ordem sucessiva de passos. Primeiramente, é necessário compreender a precisão dos instrumentos para determinar se as variações obtidas no modelo estão dentro de limites aceitáveis. Em seguida, deve-se estabelecer os resultados esperados da calibração. Posteriormente coletar esses dados experimentais, garantindo que correspondam às respostas esperadas na etapa analisada.

Após reunir os dados experimentais, é hora de compará-los com os resultados do modelo. Qualquer discrepância entre os dois conjuntos de dados pode exigir ajustes nos parâmetros dos materiais do modelo ou nas condições de contorno para minimizar as diferenças observadas, conforme exemplificado pelo fluxograma da Figura 8.



Figura 8. Fluxograma de comparação entre os dados experimentais e os resultados do modelo.
Fonte: das autoras.

4 RESULTADOS

Na Figura 9 são exibidos os resultados do modelo realizado para a seção em núcleo argiloso e espaldar de enrocamento, apresentando as máximas deformações horizontais (Figura 9A e 9B) e verticais (Figura 9C e 9D), derivadas da modelagem realizadas nas duas etapas, acompanhadas por um resumo dos deslocamentos máximos observados das etapas (Figura 9E).

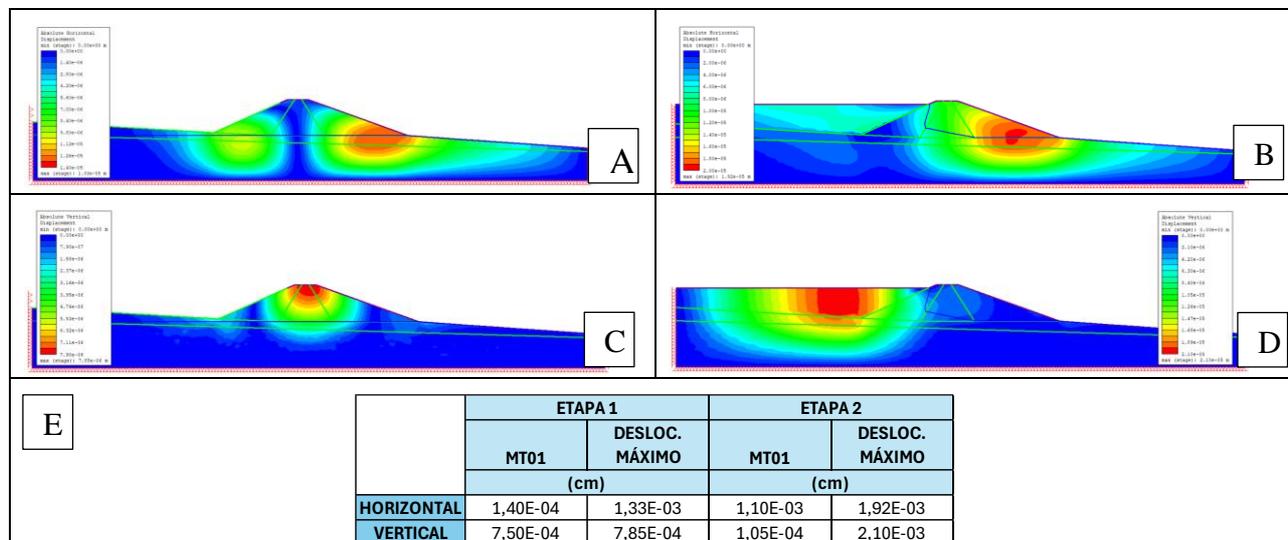


Figura 9. Máximas deformações horizontais e verticais e deslocamentos máximos nas duas etapas para a seção de núcleo argiloso e espaldar de enrocamento.
 Fonte: das autoras.

Na Figura 910 são exibidos os resultados do modelo realizado para a seção de aterro compactado apresentando as máximas deformações horizontais (Figura 10A e 10B) e verticais (Figura 10C e 10D), derivadas da modelagem realizadas nas duas etapas, acompanhadas por um resumo dos deslocamentos máximos observados das etapas (Figura 10E).

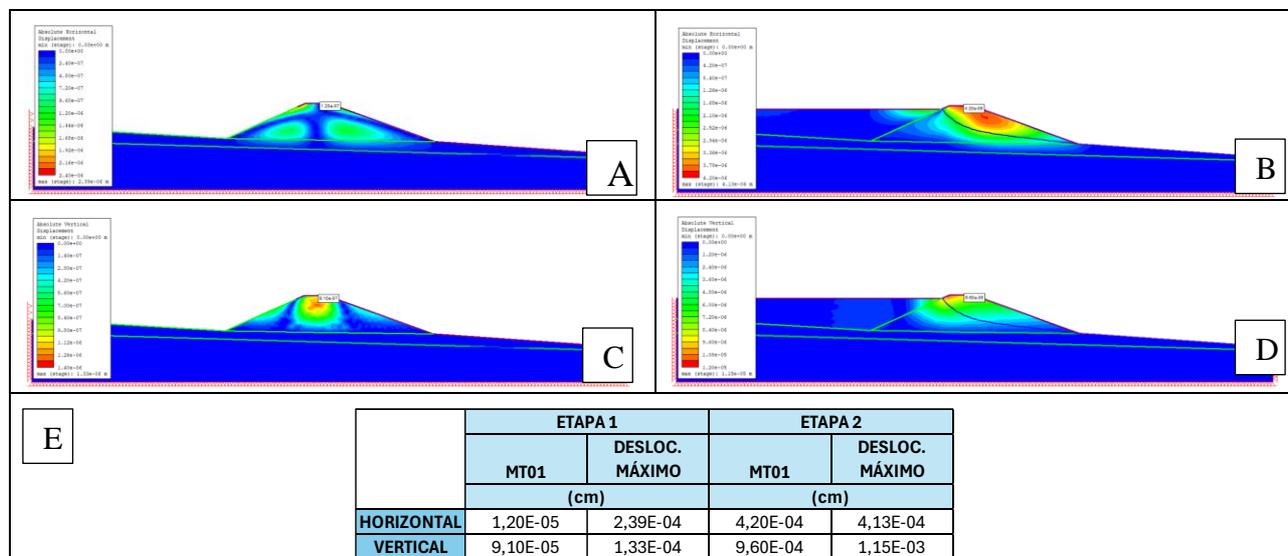


Figura 10. Máximas deformações horizontais e verticais e deslocamentos máximos nas duas etapas para a seção de aterro compactado.
 Fonte: das autoras.

Destaca-se que o fluxo calibrado, com superfície freática representada na linha azul, está em concordância com as variações esperadas no nível d'água do reservatório. Além disso, os deslocamentos

resultantes variaram de 1×10^{-3} a 1×10^{-5} cm, indicando baixos valores de recalque e coerentes com as expectativas relacionadas ao carregamento do modelo e às características mecânicas dos materiais da estrutura.

Para a seção com núcleo argiloso e espaldar de enrocamento, observou-se que os deslocamentos horizontais foram mais significativos na região de jusante em ambas as etapas. Já em relação aos deslocamentos verticais, na etapa 1, eles foram mais expressivos na região da crista, enquanto após o enchimento do reservatório, os maiores deslocamentos ocorreram no material do rejeito depositado no reservatório.

Por fim, verificou-se que a seção de aterro compactado apresentou maiores deslocamentos na região do coroamento da estrutura, tanto para os deslocamentos horizontais quanto para os verticais.

5 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou uma aplicação dos elementos-chave necessários para a realização de uma modelagem de tensão-deformação utilizando o software RS2, através de uma modelagem sugerida em barragens hipotéticas, discutindo as particularidades do modelo proposto e indicando suas abordagens.

Os resultados obtidos revelaram que os dados de entrada aplicados na simulação responderam conforme o esperado, influenciando o desempenho da estrutura e permitindo a visualização dos deslocamentos obtidos do modelo constitutivo elástico linear de Mohr-Coulomb.

Embora este estudo tenha contribuído para a compreensão dos elementos essenciais para a aplicação de uma modelagem de tensão-deformação e demonstrado sua importância como uma introdução a esse tipo de abordagem, é crucial reconhecer que cada modelagem possui suas particularidades. Ao lidar com estruturas hipotéticas simplificadas e sem grandes complexidades, os problemas abordados neste estudo não englobam todas as possíveis dificuldades encontradas em uma modelagem numérica em estruturas reais.

Além disso, é fundamental considerar a avaliação e compreensão do modelo constitutivo apropriado para cada caso, assim como um conhecimento técnico adequado para interpretar as respostas fornecidas pelo software. Este estudo oferece um ponto de partida para futuras pesquisas e aplicações práticas, destacando a importância da análise minuciosa e da compreensão profunda dos processos envolvidos na modelagem de tensão-deformação.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem o apoio da Pimenta de Ávila pelo apoio e incentivo na elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNARDO, A., S., B., GUTEMBERG, S., and Ribeiro, S. *Estudo Tensão Deformação Da Barragem Do Torto*. 2020.
- BRINKGREVE, R.B.J. *Engin, E. & Swolfs - W.M. PLAXIS 2014*. Delft, the Netherlands: Plaxis bv. 2014
- DA SILVA, P. H. A. et al. *Stress-Strain Behavior of a Bauxite Tailings Dam Based on Field Monitoring Data*. Proceedings of the 40th International ICSOBA Conference, p. 8, out. 2022.
- MARANGON, M. *Mecânica dos solos – Apostila com notas de aula – Universidade Federal de Juiz de Fora*, Juiz de Fora, 2018.