

Aplicação do Método do Ponto Material (MPM) para o Estudo da Estabilidade de Taludes com Influência de Poropressão

José Thiago da Silva Maciel

Mestrando, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil,
jtsmaciel@estudante.ufscar.br

Tiago de Jesus Souza

Professor, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil,
tiagosouza@ufscar.br

RESUMO: O estudo da estabilidade de taludes se trata de um assunto de extrema importância tendo em vista o número elevado de tragédias associadas à ruptura e ao deslizamento de encostas que ocorrem todo ano, em especial no Brasil. Diversos métodos têm sido empregados para avaliar a estabilidade de taludes, como o Método do Equilíbrio Limite (MEL) e o Método dos Elementos Finitos (MEF), permitindo obter informações como o fator de segurança e as deformações limites no solo, mas que apresentam limitações ao lidar com grandes deformações de forma a estimar o alcance da ruptura de solo e prever possíveis impactos. Assim, o Método do Ponto Material (MPM) surge como alternativa, uma vez que sua metodologia de malha de fundo fixa que permite simular grandes deformações com boa eficácia. Assim, este trabalho tem como objetivo utilizar o MPM no estudo da estabilidade de um talude conceitual, comparando cenários com e sem a influência da poropressão induzida por infiltração. Os resultados demonstraram que a presença de poropressão reduz significativamente a estabilidade do maciço, resultando em maiores deslocamentos e ruptura mais profunda. A modelagem evidenciou a importância do acoplamento hidromecânico na previsão de falhas, reforçando o MPM como ferramenta eficaz na análise de estabilidade em taludes.

PALAVRAS-CHAVE: Método do Ponto Material; Resistência dos solos; Estabilidade de Taludes; Grandes Deformações.

ABSTRACT: The study of slope stability is an extremely important subject in view of the high number of tragedies associated with slope rupture and landslides that occur every year, especially in Brazil. Several methods have been used to evaluate the stability of slopes, such as the Limit Equilibrium Method (MEL) and the Finite Element Method (FEM), allowing to obtain information such as the safety factor and the limit deformations in the soil, but which have limitations when dealing with large deformations in order to estimate the scope of soil failure and predict possible impacts. Thus, the Material Point Method (MPM) emerges as an alternative, since its fixed background mesh methodology allows simulating large deformations with good effectiveness. Thus, this work aims to use MPM in the study of the stability of a conceptual slope, comparing scenarios with and without the influence of pore pressure induced by infiltration. The results showed that the presence of pore pressure significantly reduces the stability of the massif, resulting in greater displacements and deeper rupture. The modeling evidenced the importance of hydromechanical coupling in the prediction of failures, reinforcing MPM as an effective tool in the analysis of slope stability.

KEYWORDS: Material Point Method; Soils Resistance; Slope Stability; Large Deformations.

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa são fenômenos naturais altamente catastróficos, sendo assim, realizar estudos por meio de métodos que permitam a avaliação numérica de seu comportamento é essencial para mitigar e prevenir os possíveis impactos gerados por esses eventos. Essas tragédias, são em grande parte motivadas pela redução dos parâmetros de resistência do solo resultantes da ação das chuvas e consequente aumento do lençol



2025

frático, resultando na perda de tensão efetiva do solo levando à ruptura. Entender esse comportamento é de suma importância para evitar tragédias, principalmente em grandes centros urbanos.

Métodos como o Equilíbrio Limite, e outros mais avançados, como o Método dos Elementos Finitos, tem sido amplamente utilizados na análise de estabilidade de taludes, de forma a se estimar o fator de segurança para um talude, bem como as deformações que podem ocorrer. Entretanto, tais métodos apresentam uma limitação quando aplicado a grandes deformações, devido a problemas de deformabilidade de malha, dificultando o estudo do comportamento do solo durante o processo de ruptura, bem como o alcance final da massa de solo, além de que o método do equilíbrio limite não permite estimar deformações por ser um método rígido-plástico idealizado, o que limita sua aplicação em grandes deslocamentos.

Frente às limitações destes métodos, o método do ponto material (MPM) passou a ser amplamente utilizado para simular uma variedade de problemas geotécnicos, com formulações, validações e comparações realizadas em diversas áreas dentro da geotecnia como o comportamento de túneis (Fernández et al., 2021), deslizamentos em solo (Rojas et al., 2021) e em rochas (Fernández, Vargas Jr, et al., 2023), além de rupturas de barragens de rejeitos (Mostafa & El-Naggar, 2022). Trata-se de um método baseado no método partícula em célula (PIC, do inglês *Particle in Cell*), em que um determinado material é discretizado em vários pontos aos quais são atribuídas informações de massa e outras variáveis (velocidade, tensão e deformação). Em seguida, as funções que descrevem o deslocamento desses pontos são resolvidas de forma incremental, proporcionando um modelo capaz de analisar grandes deformações no material estudado. Apesar de já terem sido realizados muitos estudos no contexto internacional, este método ainda é pouco difundido nacionalmente, evidenciando a necessidade de novos estudos sobre o MPM.

Assim, o presente estudo temo como objetivo apresentar o comportamento de uma ruptura de um talude por meio do Método do Ponto Material, avaliando a influência da ação da poropressão no comportamento do maciço e evolução do processo de ruptura.

2 ESTABILIDADE DE TALUDES

Em geral, a previsão dos possíveis modos de ruptura está condicionada à presença de heterogeneidades ao longo do perfil do talude. Assim, camadas com contrastes elevados de resistência ou a existência de descontinuidades, oriundas de fissuras, juntas preservadas da rocha-mãe, veios ou camadas de baixa resistência, camadas de preenchimento de juntas, etc.; acarretam mudanças bruscas na superfície de ruptura, tornando-a multiplanar ou mista (GERSCOVICH, 2016).

Dessa forma, de acordo com Gerscovich (2016) os escorregamentos de taludes podem assumir diferentes formas, dependendo das características do material e das descontinuidades presentes. Os escorregamentos planares ou translacionais ocorrem ao longo de planos de fraqueza, sendo comuns em colúvios delgados sobre rochas. Os escorregamentos em cunha surgem da interseção de planos de fraqueza ou da presença de camadas inclinadas. Em solos homogêneos, predominam rupturas circulares, que podem ser alteradas pela anisotropia do material. Já os escorregamentos rotacionais podem ser múltiplos, retrogressivos ou progressivos, conforme a evolução e a direção da ruptura. Por fim, as rupturas mistas ocorrem em terrenos heterogêneos, com materiais de diferentes resistências.

As causas de instabilidade em taludes podem ser classificadas em externas, internas e intermediárias. As causas externas resultam de ações que aumentam as tensões cisalhantes no maciço, como a elevação da inclinação do talude, sobrecarga na crista e eventos sísmicos. As causas internas reduzem a resistência ao cisalhamento do solo, sem alterar visivelmente a geometria, como o aumento da poropressão ou a perda de coesão. Já as causas intermediárias incluem fenômenos que não se enquadram nas categorias anteriores, como liquefação espontânea, erosão interna e rebaixamento do nível de água.

A água em especial tem uma forte influência na estabilidade do talude. Além do carreamento do solo superficial, resultando em erosão, ela também pode reduzir a coesão aparente do solo quando ocorre uma permeabilidade crescente com a profundidade em maciços rochosos. Um outro efeito, resultante da elevação do nível de água, é o aumento da poropressão, que reduz as tensões normais efetivas reduzindo assim a tensão de cisalhamento do solo, o que contribui para a desestabilização do maciço. A infiltração intensa devido à eventos pluviométricos pode induzir variações significativas no nível freático e aumento da pressão neutra, potencializando mecanismos de desestabilização.

3 MÉTODO DO PONTO MATERIAL

Em seus estudos, Sulsky et al (1994) e Sulsky et al (1995) propõem uma extensão do método partícula-em-célula (PIC) onde o corpo material é discretizado em partículas que são interpretadas como pontos materiais, onde os meios para determinar o gradiente espacial é fornecido através de uma grade computacional euleriana que pode ser fixa ou adaptada conforme a necessidade.

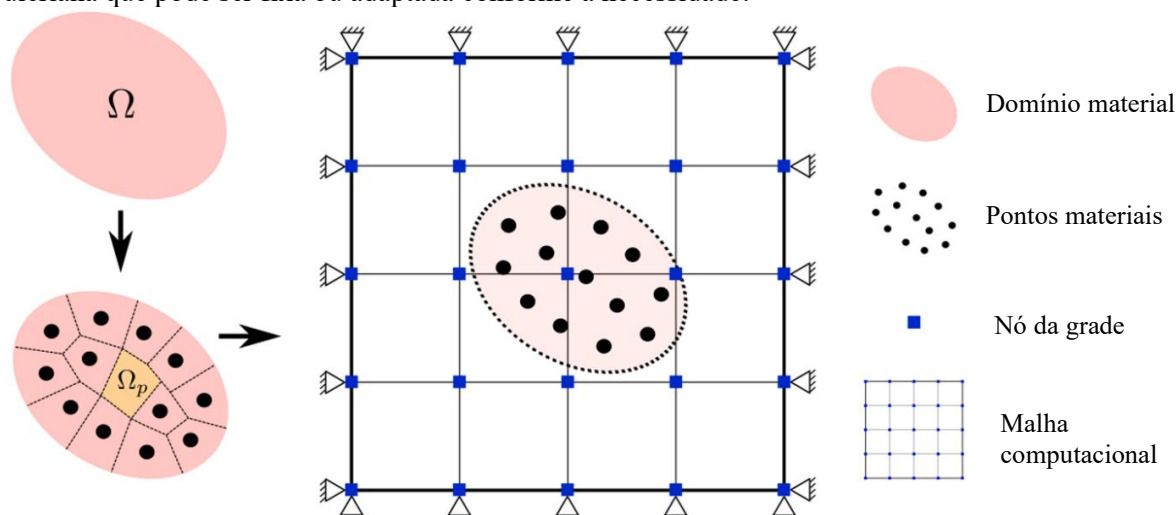


Figura 1. Discretização do corpo material no MPM (Fonte: Adaptado de FERNÁNDEZ et al., 2021)

No MPM, as equações de estado são resolvidas na malha euleriana que cobre todo o domínio lagrangeano do problema por meio de funções de forma que transportam as informações de estado dos pontos materiais para os nós da malha, onde serão aplicadas as condições de contorno e resolvidas as equações de movimento de forma incremental (Rojas, 2019), de forma semelhante ao que acontece no método dos elementos finitos (MEF).

Após serem resolvidas essas equações, os resultados são interpolados para os pontos, e então são atualizadas as informações de estado nos mesmos. Em seguida as informações presentes nos nós da malha podem ser então descartadas para que seja iniciada uma nova iteração (Figura 2). Os detalhes numéricos, com todo o desenvolvimento das equações de governo, discretização e o algoritmo completo de cálculo podem ser consultados nos trabalhos de Ceccato et al. (2022), J. Fern et al. (2019) e Nguyen et al. (2023).

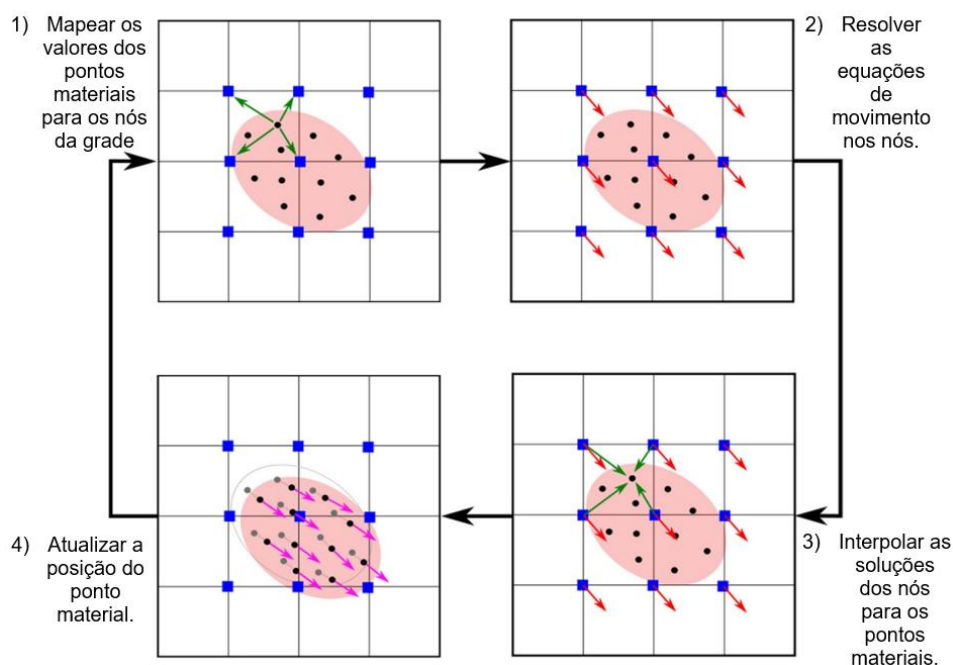


Figura 2. Etapas do ciclo computacional do MPM. (Fonte: Adaptado de Fernandez et al., 2023)

O MPM é um método eficiente para a análise de um movimento de massa considerando as etapas antes da ruptura, durante a ruptura e o desenvolvimento do movimento, permitindo assim analisar diferentes tipos de deslizamentos em termos relativamente simples e com um custo operacional aceitável (Rojas, 2019). Além disso, ele fornece uma melhor representação da falha, o que pode auxiliar de forma mais assertiva a tomada de ações pós-ruptura (Mostafa & El-Naggar, 2022). Outra vantagem importante, segundo Augarde et al, (2021), está no fato de que o MPM possui uma malha de fundo reutilizável, que permanece sem distorções durante todo o processo de simulação. Esse recuso permite a reutilização da malha original em cada ciclo de cálculo, o que simplifica o processo computacional e reduz erros associados à distorção da malha.

Dentre as desvantagens, quando comparado ao MEF, Llano-Serna e Farias (2016) destacam que o MPM apresenta um tempo de computação maior, principalmente em problemas quase estáticos ou com baixos deslocamentos, o que favorece a utilização do MEF. Além disso, Mostafa e El-Naggar (2022) destacam outra desvantagem que é o fato de não ser um software comercial fácil de usar, necessitando de códigos especiais para serem baixados e programados. Os programas que utilizam esse método de análise ainda precisam ser melhor refinados e calibrados para se tornarem mais intuitivos e de fácil utilização. Outra desvantagem importante do MPM é o fato de, assim como no MEF, não ser possível obter o fator de segurança (FS) contra falha diretamente através de seu uso, o que representa um inconveniente na prática de análise de estabilidade de taludes (Mostafa & El-Naggar, 2022).

Apesar dessas desvantagens, o MPM é uma importante ferramenta para a análise de grandes deformações e que tende a ser aperfeiçoada a medida em que são feitas avaliações rigorosas desse método na literatura (Llano-Serna & Farias, 2016; Mostafa & El-Naggar, 2022; Rojas, 2019).

4 MODELO NUMÉRICO

Neste estudo, foi desenvolvido um modelo conceitual, de forma a evidenciar os efeitos resultantes da poropressão na estabilidade do talude e o alcance da ruptura. A figura 3 apresenta o modelo desenvolvido. Foi adotado um talude homogêneo e aplicada uma carga constante de 50kPa distribuída na crista. Foram escolhidos três pontos como referência, localizados na crista, a meia altura e no pé do talude, sendo denominados respectivamente por A, B e C.

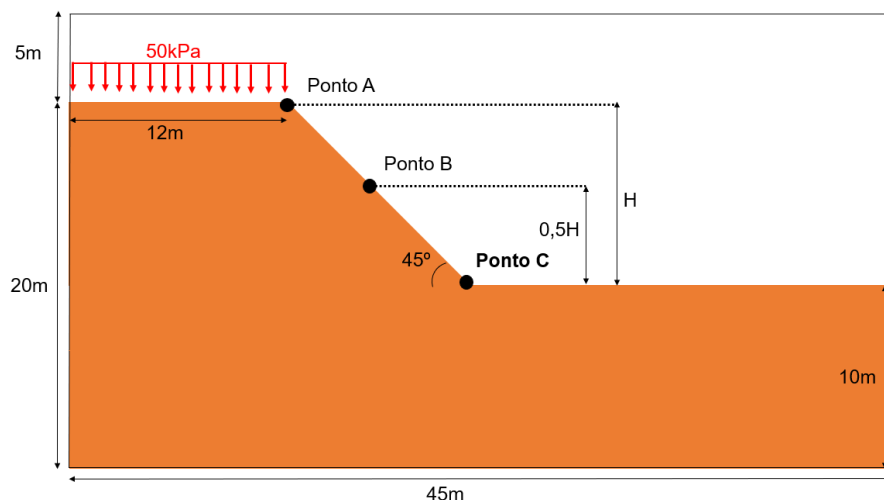


Figura 3. Talude conceitual desenvolvido para a análise

As características do solo foram determinadas com base no trabalho de Ceccato *et al.* (2022), e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros adotados para o modelo

| Parâmetro | Valor |
|--|-------|
| Porosidade | 0,4 |
| Densidade dos sólidos (kg/m ³) | 2650 |
| Densidade dos líquidos (kg/m ³) | 1000 |
| Permeabilidade intrínseca dos líquidos (m ²) | 6e-12 |
| Modulo de amortecimento dos líquidos (kPa) | 60000 |
| Viscosidade dinâmica dos líquidos | 1e-6 |
| K0 | 0,5 |
| Módulo de Young (kPa) | 30000 |
| Coefficiente de Poisson | 0,3 |
| Coesão (kPa) | 0,1 |
| Ângulo de Atrito (°) | 25 |

Para as condições de saturação, foi determinada por uma linha freática como mostrado na Figura 4, além de ser aplicada uma infiltração da ordem de $2 \cdot 10^{-4}$ m/s, de forma a simular uma chuva de alta intensidade durante a ruptura tal como adotado por Ceccato *et al* (2022).

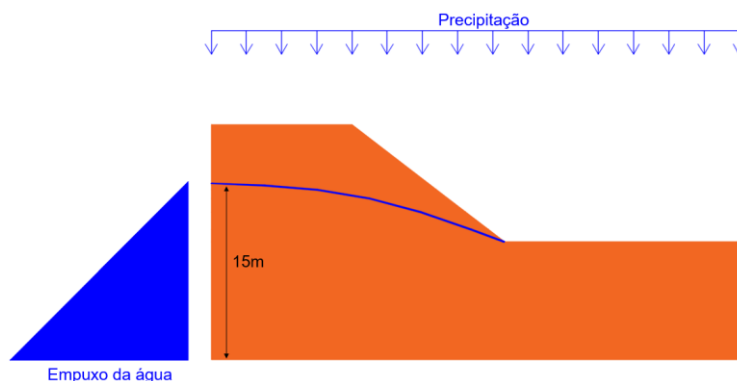


Figura 4. Condições de saturação no talude

As análises foram conduzidas com o auxílio do programa Anura3D, com malha de fundo composta por elementos triangulares de 1m de lado e 3 pontos materiais por elemento (Figura 5). Como condições de contorno, foram adotadas restrições no eixo X para as laterais, no eixo Y para o topo e em ambos os eixos para a base do modelo, sendo aplicadas tanto para a parte sólida quanto para a parte líquida.

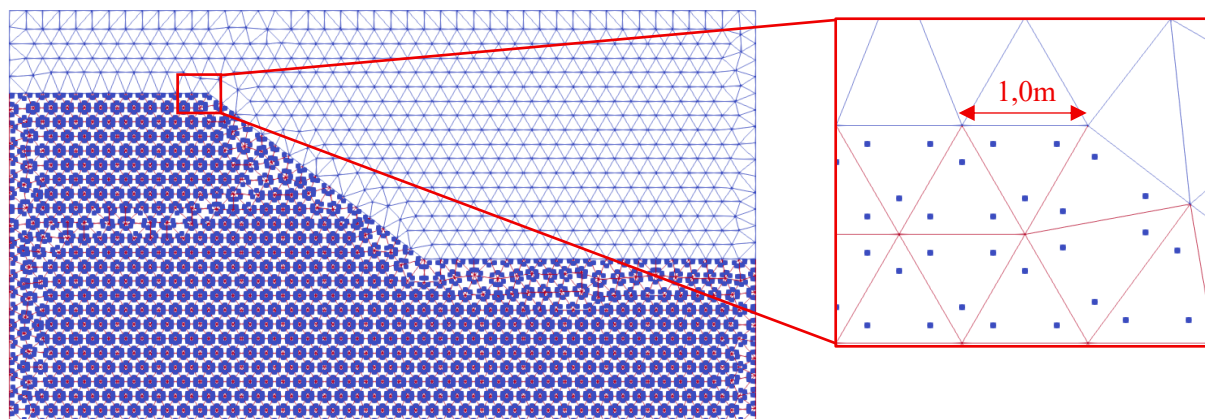


Figura 5. Malha adotada no modelo, e número de pontos materiais por elemento no detalhe

Para a análise, foi considerado o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, utilizando o tipo de material “Unsaturated material-2-phase with suction effect” do Anura3D para o modelo com a influência da poropressão, e o tipo “Dry-material” para o modelo sem poropressão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No primeiro cenário, foi realizado o modelo sem a influência da poropressão, tendo como gatilho de ruptura apenas a ação da sobrecarga na crista e ação do peso próprio do solo. Já no segundo cenário foi aplicada, além da sobrecarga e do peso próprio, uma carga de poropressão em virtude do nível d'água e de uma infiltração devido à precipitação da chuva. Na Figura 6 é possível visualizar o resultado da ruptura em ambos os cenários após 30s de ruptura.

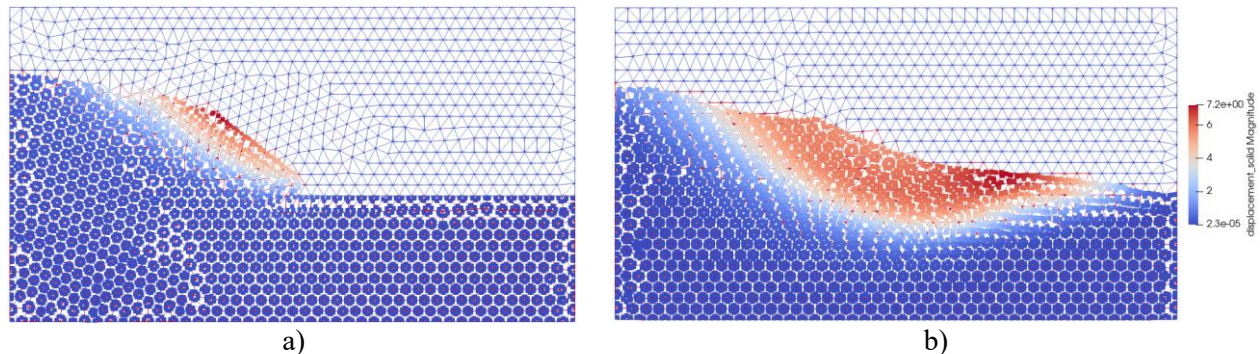


Figura 6. Deslocamentos totais no talude 30s após a ruptura com (a) e sem (b) a influência da poropressão

É possível notar que no caso do solo sem poropressão, a superfície de ruptura se deu de forma mais planar, enquanto que sob a influência de poropressão a ruptura ocorreu de forma rotacional. Além disso, no segundo caso o decréscimo da resistência do material devido à redução das tensões efetivas resultou em deslocamentos mais elevados, o que é condizente com o que se espera do comportamento do solo nessa condição. Isso é evidenciado pelo gráfico da Figura 7, onde é possível ver a magnitude dos deslocamentos nos pontos A, B e C. Para o caso sem poropressão (SP), os deslocamentos ocorreram com mais intensidade nas regiões mais altas do talude, sendo mais alto na crista e depois na região central, com menos deslocamento no pé do talude. Já com a poropressão (CP), devido à natureza rotacional da ruptura, os deslocamentos maiores ocorreram no pé, enquanto que a crista e a região central do talude apresentaram os mesmos deslocamentos, demonstrando que não houve deformações excessivas nesses pontos.

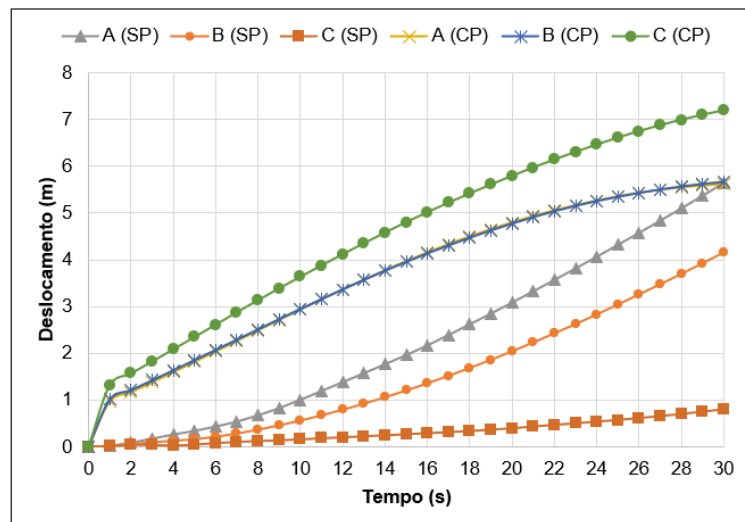


Figura 7. Deslocamentos totais nos pontos A, B e C para os cenários sem poropressão (SP) e com poropressão (CP)

Esses resultados demonstram que a poropressão atua de forma decisiva na redução da resistência efetiva e na aceleração do processo de ruptura, influenciando diretamente tanto a magnitude quanto a distribuição dos deslocamentos ao longo do talude.

6 CONCLUSÕES



O presente trabalho evidenciou o potencial do Método do Ponto Material (MPM) na análise da estabilidade de taludes sujeitos à influência da poropressão decorrente de processos de infiltração. A modelagem demonstrou que a poropressão exerce um papel determinante na estabilidade do talude, reduzindo as tensões efetivas e acarretando em rupturas mais profundas e com características rotacionais no talude. Além disso, a massa de solo nessa condição obteve deslocamentos maiores em comparação com o talude na condição seca, indicando a importância da determinação assertiva dos parâmetros hidráulicos para o melhor planejamento de medidas de estabilização e mitigação dos riscos geotécnicos associados à ruptura de solos.

Apesar das limitações associadas à determinação do fator de segurança, os resultados mostram o potencial do MPM para análises avançadas dentro da geotecnia. Recomenda-se para trabalhos futuros a aplicação do método em taludes reais, calibrando os parâmetros com base em dados experimentais e na instrumentação de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anura 3D® (2017) *Anura3D MPM Software – Tutorial Manual*. Anura3D MPM Research Community.
- Augarde, C. E., Lee, S. J., & Loukidis, D. (2021). Numerical modelling of large deformation problems in geotechnical engineering: A state-of-the-art review. *Soils and Foundations*, 61(6), 1718–1735. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.08.007>.
- Ceccato, F., Fern, J., Martinelli, M., Rohe, A., & Yerro, A. (2022). *Anura3D MPM Software, Scientific Manual* (p. 80). Anura3D MPM Research Community. www.Anura3D.com.
- Fern, J., Rohe, A., Soga, K., & Alonso, E. (2019). *The Material Point Method for Geotechnical Engineering A Practical Guide*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Fernández, F., Juajinoy, D. S. C., Vargas, E., Velloso, R. Q., & Dias, D. (2023). Basal Heave Stability Analysis of a Circular Shaft Excavation Considering FEM, NLA, and MPM Approaches. *Geotechnical and Geological Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02693-1>.
- Fernández, F., Rojas, J. E. G., Vargas, E. A., Velloso, R. Q., & Dias, D. (2021). Three-dimensional face stability analysis of shallow tunnels using numerical limit analysis and material point method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103904>.
- Gerscovich, Denise M. S. *Estabilidade de taludes*. 2ª Edição. São Paulo. Oficina de Textos, 2016, 192p
- Llano-Serna, M. A., & Farias, M. M. (2016). Validación numérica, teórica y experimental del método del punto material para resolver problemas geotécnicos. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, 32(2), 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.02.008>.
- Maciel, J. T. da S., Souza, T. de J., & Querelli, A. (2024). Use of the Material Point Method (Mpm) for Hipotetical Rupture Analysis of a Tailing Pile. *Contribuciones a las ciencias sociales*, 17(6), e7839. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.6-331>.
- Mostafa, H. H., & El-Naggar, H. M. (2022). Material point method for modeling the static liquefaction-induced Fundão Dam failure. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(6). <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00953-2>.
- Nguyen, V. P., Vaucorbeil, A. de, & Bordas, S. (2023). *Scientific Computation The Material Point Method Theory, Implementations and Applications*. Springer Nature.
- Rojas, D. T. (2019). *Avaliação da influência das propriedades do material na evolução dos movimentos de massa utilizando o método do ponto material* [Dissertação (Mestrado)]. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
- Rojas, D. T., Neto, M. P. C., de Farias, M. M., & Reinaldo, R. L. (2021). Analysis of the failure modes and development of landslides using the material point method. *Soils and Rocks*, 44(1). <https://doi.org/10.28927/SR.2021.057820>.
- Sulsky, D., Chen, Z., & Schreyer, H. L. (1994). A particle method for history-dependent materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 118(1), 179–196. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7825\(94\)90112-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7825(94)90112-0).



Sulsky, D., Zhou, S.-J., & Schreyer, H. L. (1995). Application of a particle-in-cell method to solid mechanics. *Computer Physics Communications*, 87(1), 236–252. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-4655\(94\)00170-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-4655(94)00170-7).