XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/37

Avaliação do Comportamento de Taludes Reais pelo Método do Ponto Material (MPM) e Comparação com o Método dos Elementos Finitos

José Thiago da Silva Maciel
Mestrando, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos Brasil, jtsmaciel@estudante.ufscar.br

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

RESUMO: Este trabalho apresenta a análise do comportamento de um talude real utilizando o Método do Ponto Material (MPM), implementado no software Anura3D, comparando os resultados com os obtidos por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). O estudo teve como objetivo investigar deformações, redistribuição de tensões e evolução de potenciais mecanismos de instabilidade, considerando as características geotécnicas do solo e as condições de carregamento específicas do caso. O MPM, por combinar abordagens Lagrangiana e Euleriana, permite simular grandes deformações e deslocamentos localizados de forma mais precisa que o MEF clássico, especialmente em solos não lineares. A comparação evidencia diferenças na previsão de deslocamentos máximos e zonas críticas, demonstrando a importância do MPM como ferramenta avançada para avaliação de segurança e otimização de projetos de contenção de taludes em obras reais.

PALAVRAS-CHAVE: Método do Ponto Material (MPM), Método dos Elementos Finitos (MEF), Estabilidade de Taludes, Grandes Deformações, Caso Real.

ABSTRACT: This study presents the analysis of the behavior of a real slope using the Material Point Method (MPM), implemented in the Anura3D software, comparing the results with those obtained through the Finite Element Method (FEM). The objective of the study was to investigate deformations, stress redistribution, and the evolution of potential instability mechanisms, considering the geotechnical characteristics of the soil and the specific loading conditions of the case. MPM, by combining Lagrangian and Eulerian approaches, makes it possible to simulate large deformations and localized displacements more accurately than classical FEM, especially in nonlinear soils. The comparison highlights differences in the prediction of maximum displacements and critical zones, demonstrating the importance of MPM as an advanced tool for safety assessment and optimization of slope stabilization projects in real-world engineering works
.

KEYWORDS: Material Point Method (MPM), Finite Elements Method (FEM), Slope Stability, Large Deformations, Real Case.

1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista o comportamento dos movimentos de massa, que possuem um potencial altamente catastrófico dependendo da sua magnitude e natureza, a modelagem numérica desses fenômenos se destaca como uma ferramenta importante para avaliar as causas, o comportamento e possíveis impactos gerados por esses eventos. Entretanto, dependendo da complexidade do objetivo do estudo, métodos tradicionais como o Método do Equilíbrio Limite, e outros mais avançados como como Método dos Elementos Finitos, apresentam dificuldades em simular o problema desde o início do movimento até o final do seu desenvolvimento.

Frente às limitações destes métodos, o método do ponto material (MPM), de recente aplicação no Brasil, passou a ser utilizado para simular diferentes problemas geotécnicos, com formulações, validações e comparações realizadas em diversas áreas dentro da geotecnia como o comportamento de túneis (Fernández et al., 2021), deslizamentos de taludes de solos (Rojas et al., 2021) e em taludes rochosos (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) e 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, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de um talude real, por meio de análise numérica utilizando o MPM, e comparar os resultados com os resultados obtidos por meio de métodos convencionais como é o caso do MEF, de forma a evidenciar o potencial do MPM para o uso no meio técnico-profissional.

2 ESTUDO DE CASO

Para este estudo, foi conduzida a análise de estabilidade de um talude situado na Rua Dr. Altíno Teixeira, no Bairro Porto Seco, localizado na cidade de Salvador-BA. A área se trata de um área plana onde será feito um empreendimento, apresentando taludes íngremes na adjacências da área (Figura 1a). Os taludes apresentam inclinações de 20º e 42º, com altura máxima de 30,0m e uma cobertura vegetal sobre o talude, sem nenhum tipo de drenagem presente. Neste estudo, será apresentada a análise feita em uma das seções do talude, com 21,5m de altura e inclinação de 33º (Figura 1b).

O solo do talude é constituído por uma camada de areia média siltosa, com aproximadamente 8,0m de espessura, cujo N_{SPT} varia de 4 a 13 golpes. Abaixo dessa camada se identificou uma camada de silte arenoso, também com 8,0m de espessura e um N_{SPT} acima de 11 golpes. A camada seguinte foi identificada como uma areia siltosa menos intemperizada (solo de alteração de rocha), seguida do impenetrável ao amostrador. Não foi observado nível d'água.

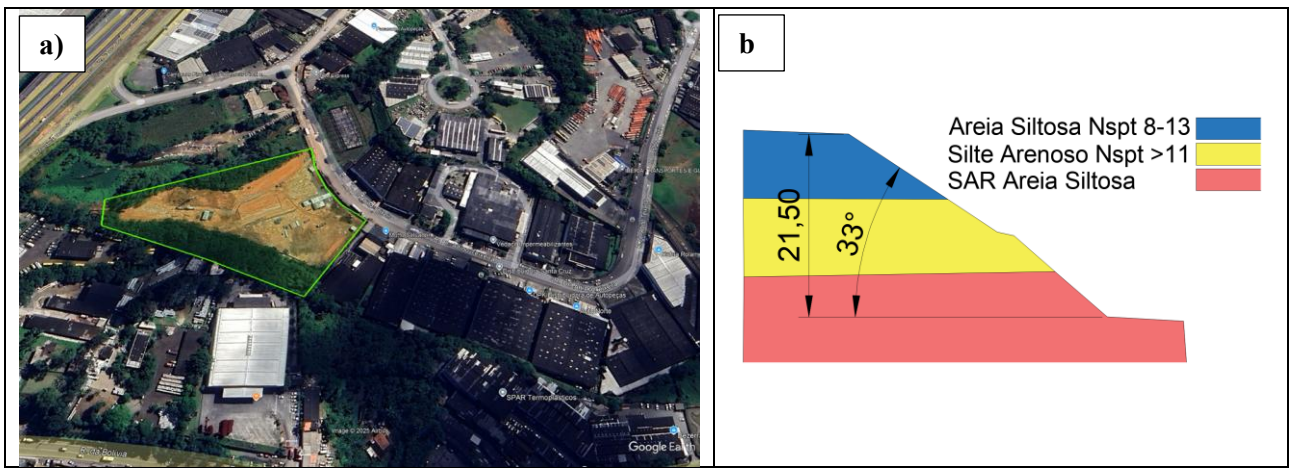


Figura 1. a) Localização e acesso. b) Talude analisado. Fonte: Autor (2026).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Premissas: método de cálculo, software e critério de ruptura para o Método do Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é um método de análise numérica que possui um papel fundamental na engenharia geotécnica, abordando diversos desafios como a análise de fundações, a simulação de comportamentos de solos sob carga e a avaliação de interações solo-estrutura, permitindo uma compreensão mais aprofundada dos fenômenos envolvidos através de modelos 2D e 3D. É uma das técnicas mais usadas na geotecnia para encontrar soluções aproximadas para problemas de valor limite, em que a geometria do material

é discretizada por meio de uma malha de elementos finitos lagrangeana equivalente à malha original (Colom, 2015).

Assim, a avaliação da estabilidade do talude foi conduzida por meio do MEF de forma a avaliar as tensões, deslocamentos e deformações ao longo do maciço. Para essa abordagem, utilizou-se o Abaqus, programa amplamente empregado em análises de MEF avançadas, que permite modelagem numérica bidimensional ou tridimensional com elevado nível de controle sobre malha, leis constitutivas, condições de contorno e estratégias de acoplamento hidráulico-mecânico.

A geometria do talude foi discretizada em elementos finitos do tipo C3D8R, com refinamento progressivo nas regiões de maior interesse, como a face do talude e a base potencial de ruptura. As considerações adotadas para a análise em MEF foram: materiais homogêneos e isotrópicos; análise realizada em termos de tensões efetivas; critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

3.2 Premissas: método de cálculo, software e critério de ruptura para o Método do Elementos Finitos

A análise numérica também foi conduzida por meio do Método do Ponto Material (MPM), técnica adequada para problemas envolvendo grandes deformações, movimentação intensa de material e evolução contínua da ruptura. O método combina uma representação Lagrangiana, por meio de pontos materiais que transportam massa, tensões e deformações, com uma malha Euleriana auxiliar utilizada apenas para a solução das equações de movimento. A estratégia de cálculo adota formulação explícita, com integração temporal condicionalmente estável, atualizando iterativamente acelerações, velocidades, deslocamentos e tensões a cada passo de tempo.

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).

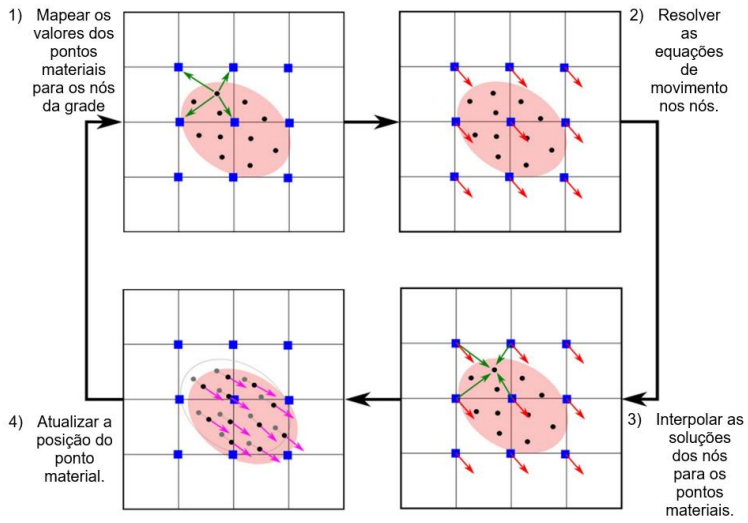


Figura 2. Ciclo de cálculo do MPM. Adaptado de Fernández et al., (2021).

As simulações foram executadas no software Anura3D, plataforma especializada na implementação do MPM para aplicações geotécnicas. O código permite a modelagem hidromecânica acoplada (formulação u–p), a representação de contato solo–estrutura e a simulação de ruptura e pós-ruptura sem limitação imposta por distorção de malha. O Anura3D utiliza pontos materiais para transportar o estado constitutivo, garantindo a

rastreabilidade do histórico de tensões mesmo sob deformações extremas, condição essencial para análises de taludes.

O comportamento mecânico do solo foi representado por modelo constitutivo elastoplástico, com resistência definida por tensões efetivas. Como critério de ruptura, empregou-se o critério de Mohr–Coulomb, amplamente utilizado em análises geotécnicas e compatível com a formulação incremental do MPM. O critério permite identificar a ativação da plastificação a partir da combinação entre tensões principais e parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito), possibilitando a avaliação de mecanismos de ruptura progressiva. Essas premissas asseguram consistência física e numérica ao modelo, permitindo a simulação adequada dos mecanismos de instabilidade e deslocamento característicos de sistemas geotécnicos sujeitos a grandes deformações.

3.3 Parâmetros geotécnicos e condições de contorno

A definição dos parâmetros neste estudo foi baseada na interpretação dos ensaios e em correlações empíricas com os valores de N_{SPT} disponíveis nos resultados das sondagens, na experiência do nosso corpo técnico e em consulta a referências bibliográficas, como, por exemplo, Joppert Jr. (2007), Guidicini & Nieble (1976), Hoek & Bray (1981), Alonso (2010) e Cruz (1996).

Assim, foram considerados os seguintes parâmetros para o modelo apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros considerados nas análises. Autor (2026)

Parâmetro	Areia Siltosa Nspt 8-13	Silte Arenoso Nspt > 11	SAR Areia Siltosa
Tipo de material	Dry Material	Dry Material	Dry Material
Porosidade inicial – n	0,56	0,56	0,56
Densidade – γ (kN/m³)	1700	1700	1800
Modelo Constitutivo	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Poisson	0,33	0,33	0,33
Módulo de deform. – E (kPa)	14000	36000	29000
Coesão – c (kPa)	3	4	16
Ângulo de atrito – φ (º)	27	29	32

O modelo desenvolvido em MPM através do Anura3D é apresentado na Figura 3a. Foi adotada uma malha não estruturada, triangular, com 3 pontos materiais dentro de cada elemento. Foram considerados elementos com 1m de largura em média.

Já o modelo em MEF (Figura 3b) foi feito através de um modelo 3D extrudado 1,0 m de forma a possibilitar a utilização de elementos C3D8R com critério de rutpura de Mohr-Coulomb. A malha foi feita com elementos de 1,0m e 3,0m de tamanho, de forma a ter um refinamento maior nas áreas em que são previstos maiores deslocamentos. Para a região de contato entre os materiais, foi aplicada uma propriedade de contato de comportamento tangencial, com a fomulação de fricção do tipo *penalty* e angulo de fricção de 28º.

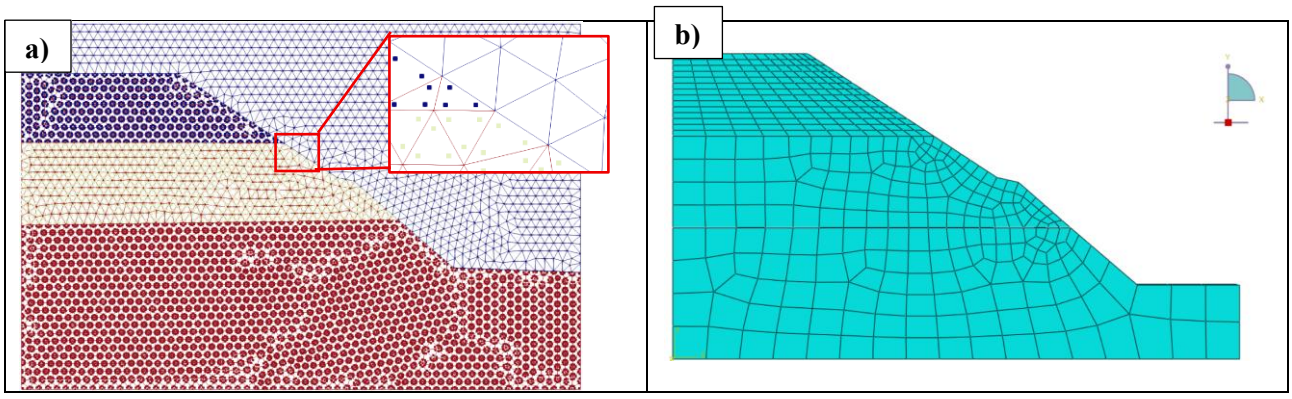


Figura 3. a) Modelo do talude usando o MPM. b) Modelo do Talude em MEF. Autor (2026)

Para as condições de contorno, considerou-se restrições laterais em ambos os modelos, e restrições horizontais e verticais na região inferior. No modelo em MPM, foi também considerada uma restrição vertical no topo da malha. Como condição de carregamento, foi feito inicialmente o equilíbrio geostático aplicando apenas o peso próprio do material. Em seguida, foi aplicada uma carga de 20kPa na crista do talude.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Evolução dos deslocamentos

A evolução dos deslocamentos foi avaliada em ambos os modelos, como apresentado na Figura 4. Foram computados os resultados referentes a 20s do processo de ruptura.

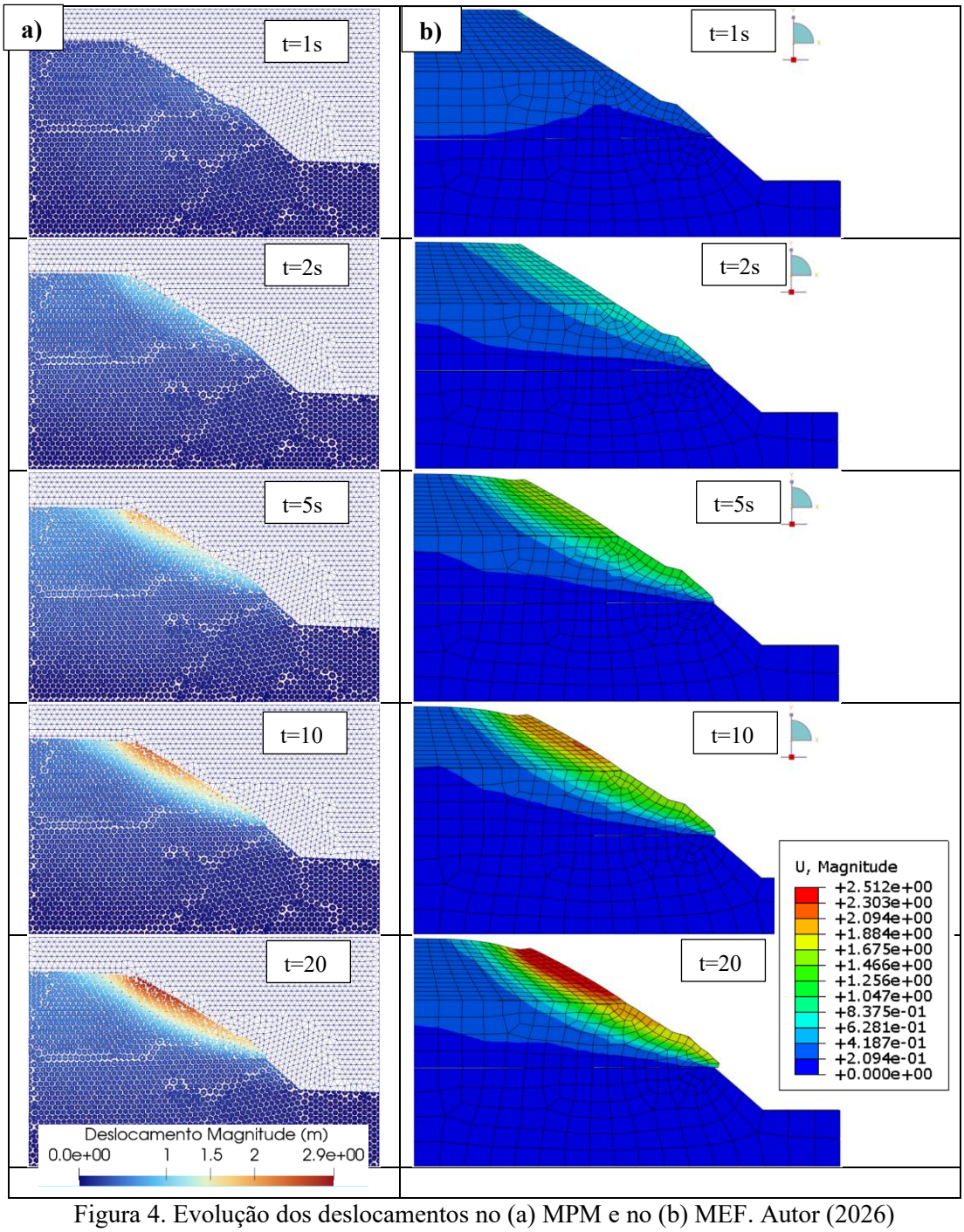


Figura 4. Evolução dos deslocamentos no (a) MPM e no (b) MEF. Autor (2026)

Considerando a análise em MPM, no segundo inicial, praticamente não houve deslocamentos devido a essa etapa ser somente para o equilíbrio das tensões geostáticas. Já no segundo seguinte é aplicado carregamento distribuído de 20kPa na crista, provocando o início do deslocamento na região da face do talude. Nos passos finais, os deslocamentos atingiram magnitudes máximas de 2,9 m, sendo os deslocamentos máximos observados nos pontos mais próximos à face do talude. Além disso, é possível visualizar a formação de uma superfície potencial de ruptura bem definida, indicando um processo de ruptura circular no talude.

Já para o modelo em MEF, observou-se uma grande similaridade com os resultados do MPM, desde o início da formação da superfície de maiores deslocamentos, até a magnitude final de deslocamentos, da ordem de 2,5 m que se mostrou relativamente próxima à magnitude obtida por meio do cálculo no Anura3D. Entretanto, alguns elementos na crista do modelo do MEF apresentaram grandes deformações, como apresentado na Figura 5.

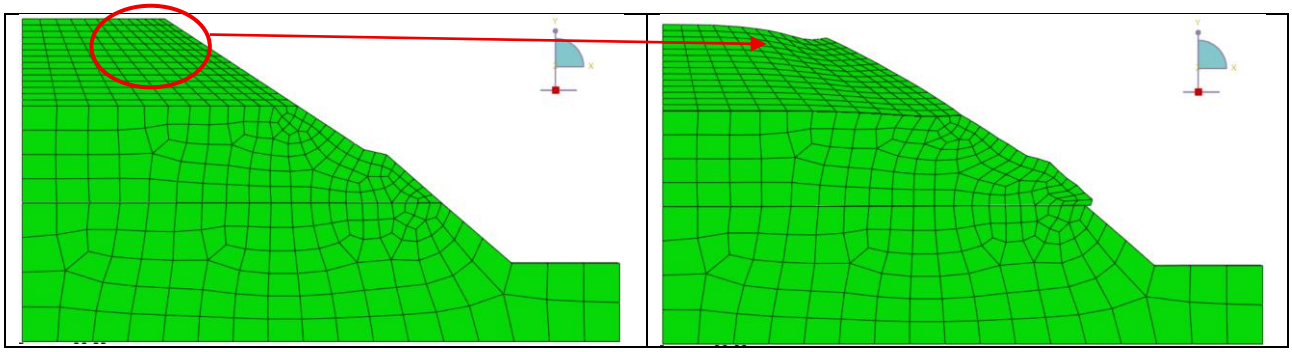


Figura 5. Evolução das deformações no modelo em MEF. Autor (2026)

Deformações excessivas podem resultar em imprecisões no cálculo, o que torna análises com grandes deslocamentos no MEF imprecisas, a menos que sejam usados métodos para ajuste da malha durante o processo de ruptura.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a análise numérica do comportamento de um talude real por meio do Método do Ponto Material (MPM), com comparação aos resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). O objetivo principal foi avaliar a capacidade de ambos os métodos em representar os deslocamentos, deformações e o mecanismo de instabilidade do maciço, considerando as condições geotécnicas e geométricas do talude estudado.

Os resultados obtidos indicaram que os dois métodos foram capazes de representar de forma consistente o comportamento global do talude, com previsão de um mecanismo de ruptura semelhante e valores de deslocamentos máximos da mesma ordem de grandeza. Entretanto, observou-se que o MPM apresentou maior estabilidade numérica na simulação do processo de deformação progressiva, permitindo a representação contínua da evolução da ruptura e de deslocamentos significativos sem ocorrência de distorções de malha.

Por outro lado, o modelo desenvolvido em MEF apresentou limitações típicas de formulações lagrangeanas quando submetidas a grandes deformações, com a ocorrência de elementos altamente distorcidos em regiões próximas à superfície do talude. Essa condição pode introduzir imprecisões na análise caso não sejam adotadas estratégias adicionais de remalhamento ou técnicas específicas para tratamento de grandes deslocamentos.

Dessa forma, os resultados evidenciam o potencial do Método do Ponto Material como uma ferramenta promissora para a análise de problemas geotécnicos envolvendo grandes deformações e evolução de mecanismos de ruptura, particularmente em estudos de movimentos de massa e instabilidade de taludes. Ao mesmo tempo, o Método dos Elementos Finitos permanece como uma ferramenta robusta e amplamente consolidada para análises de estabilidade em condições próximas ao equilíbrio.

Por fim, destaca-se que a aplicação do MPM em problemas geotécnicos ainda se encontra em fase de expansão no meio técnico nacional. Assim, estudos adicionais envolvendo diferentes condições de carregamento, presença de água, modelos constitutivos mais avançados e validação com casos monitorados

em campo podem contribuir significativamente para consolidar o método como uma ferramenta complementar às abordagens numéricas tradicionais na engenharia geotécnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, U. R. *Exercícios de fundações*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

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

Colom, A. Y. (2015). *MPM modelling of landslides in brittle and unsaturated soils* [Tese]. Universitat Politécnica de Catalunya - Program of Geotechnical Engineering and Geo-Sciences.

Cruz, P. T. *100 Barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto*. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

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

Guidicini, G.; Nieble, C. M. *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Edgard Blücher, 1976.

Hoek, E.; Bray, J. W. *Rock slope engineering*. 3. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.

Joppert Junior, I. *Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução*. São Paulo: PINI, 2007.

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