

Uso do Método do Ponto Material (MPM) para Análise de Ruptura Hipotética de uma Pilha de Rejeito

Tiago de Jesus Souza

Professor, Universidade Federal de São Carlos (Ufscar), São Carlos, Brasil,

tiagosouza@ufscar.br

Sócio Diretor, Solotechnique Engenharia e Consultoria Geotecnica, Jundiaí, Brasil,

tiago.souza@solotechnique.com.br

José Thiago da Silva Maciel

Mestrando, Universidade Federal de São Carlos (Ufscar), São Carlos, Brasil,

jtsmaciel@estudante.ufscar.br

André Querelli

Sócio Diretor, Solotechnique Engenharia e Consultoria Geotecnica, Jundiaí, Brasil,

andre.querelli@solotechnique.com.br

RESUMO: Pensando em um uso sustentável de água, e considerando o compromisso com a segurança de estruturas de disposição de rejeitos, a construção de pilhas de rejeitos tem se tornado uma alternativa vantajosa em relação às barragens convencionais, considerando os acidentes envolvendo este tipo de estrutura. Desta forma, este estudo apresenta simulações numéricas 2D focadas em uma pilha de rejeitos, visando simular uma ruptura hipotética e determinar a extensão da massa rompida usando o método do ponto material (MPM) para este tipo de obra. Uma metodologia padrão foi definida para analisar rupturas hipotéticas em taludes de pilhas, considerando diferentes fases do projeto. O nível de detalhamento necessário em cada fase (viabilidade, conceitual e básica) foi estabelecido, juntamente com a forma apropriada de apresentar os resultados, incluindo a identificação de zonas de risco e o mapeamento das estruturas afetadas. Este estudo oferece uma abordagem abrangente para analisar potenciais rupturas, contribuindo para a compreensão dos impactos e riscos associados à obra em questão.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Numérica, Método do Ponto Material, MPM, Pilha, Ruptura hipotética.

ABSTRACT: Thinking about a sustainable use of water, and considering the commitment to the safety of tailings disposal structures, the construction of tailings piles has become an advantageous alternative in relation to conventional dams, considering the accidents involving this type of structure. Therefore, this study presents 2D numerical simulations focused on a waste pile, aiming to simulate a hypothetical rupture and determine the extent of the ruptured mass using the material point method (MPM) for this type of work. A standard methodology was defined to analyse hypothetical ruptures in tailings pile slopes, considering different phases of the project. The level of detail required in each phase (feasibility, conceptual and basic) was established, along with the appropriate way of presenting the results, including the identification of risk zones and the mapping of structures risk zones and the mapping of affected structures. This study offers a comprehensive approach to analysing potential ruptures, contributing to an understanding of the of the impacts and risks associated with the work in question.

KEYWORDS: Numerical Modelling, Material Point Method, MPM, Stack; Hypothetical rupture.

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa são fenômenos naturais altamente catastróficos. 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. Métodos tradicionais, como o Método do Equilíbrio Limite, e outros mais avançados, como o Método dos Elementos Finitos, são incapazes de lidar com o problema desde o início do movimento até o final de seu desenvolvimento.

Frete 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. Por exemplo, o MPM foi aplicado na modelagem de ensaios experimentais de colapso de diques com solos moles (Fern et al., 2017), processos de erosão interna em solos instáveis e bimodais (Yerro et al., 2017), fundações (Lorenzo et al., 2013), deformações induzidas por movimentos de falhas (Johansson et al., 2007), cargas de escavadoras (Coetzee et al., 2006), ancoragem em solos (Coetzee et al., 2005), propagação de fluxos em solo induzidos por terremotos (Konagai et al., 2004), fluxo granular em silos (Wieckowski, 2003) e resposta de geomembranas a recalques (Zhou et al., 1999).

Além disso, outros pesquisadores têm contribuído para a área de movimentos de massa. Fatemizadeh e Moorman (2015) desenvolveram um programa bidimensional baseado na formulação original do MPM, com o objetivo de avaliar a capacidade do método em simular problemas de estabilidade de taludes. Essas contribuições demonstram a aplicabilidade e o potencial do MPM em diferentes contextos geotécnicos.

O objetivo deste trabalho é identificar quais e como as propriedades mecânicas do material influenciam o desenvolvimento dos movimentos de massa. Para alcançar esse objetivo, quatro objetivos específicos serão abordados:

- Avaliar a eficácia do método do ponto material (MPM) na análise do desenvolvimento dos movimentos de massa;
- Avaliar o uso do software ANURA3D em conjunto com o método do ponto material (MPM) para análises do desenvolvimento dos movimentos de massa; e
- Avaliar as propriedades mecânicas que têm impacto no desenvolvimento dos movimentos de massa usando o modelo constitutivo selecionado.

2 MÉTODO DO PONTO MATERIAL (MPM)

2.1 Generalidades do método

O método do ponto material (MPM), proposto por Sulsky et al. (1994, 1995), é uma abordagem computacional híbrida lagrangeana-euleriana desenvolvida como uma alternativa para resolver problemas na mecânica dos contínuos que envolvem grandes deformações. Ao contrário do método dos elementos finitos (MEF), que requer o mapeamento e realocação das variáveis de estado, resultando em perda de informação e imprecisões na solução final, o MPM (Llano et al., 2015) surgiu como resposta às limitações do MEF.

O método MPM combina conceitos e procedimentos do método de partículas em células (PIC) e do método dos elementos finitos. Nele, os corpos materiais são discretizados como uma coleção de partículas não conectadas entre si, cada uma transportando uma massa fixa para garantir a conservação da massa. Além disso, os parâmetros necessários para definir o estado do corpo, como tensão, densidade e histórico das variáveis, são associados aos pontos materiais (Zabala e Alonso, 2011).

A interação entre as partículas, ou seja, o cálculo das equações de movimento, ocorre nos nós de uma malha computacional euleriana estacionária semelhante à usada no MEF, que permanece constante durante todo o cálculo, eliminando assim o problema da distorção (Figura 1). Essa malha é então utilizada para determinar a solução incremental das equações governantes por meio de uma descrição euleriana (Al-Kafaji, 2013).

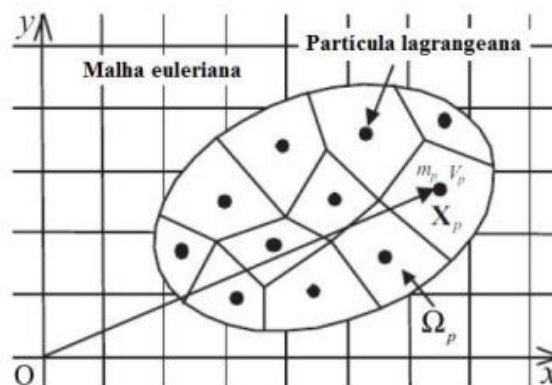


Figura 1. Malha computacional e pontos materiais no MPM (Modificado de Abe et al., 2017)

No método do ponto material (MPM), as equações de movimento são resolvidas em uma malha computacional que abrange todo o domínio do problema. Em cada etapa da análise, as quantidades transportadas pelos pontos materiais são interpoladas para os nós da malha, utilizando as funções de forma associadas a eles, de forma análoga ao método dos elementos finitos (MEF).

Um resumo dos passos de uma análise com MPM é apresentado na Figura 2.

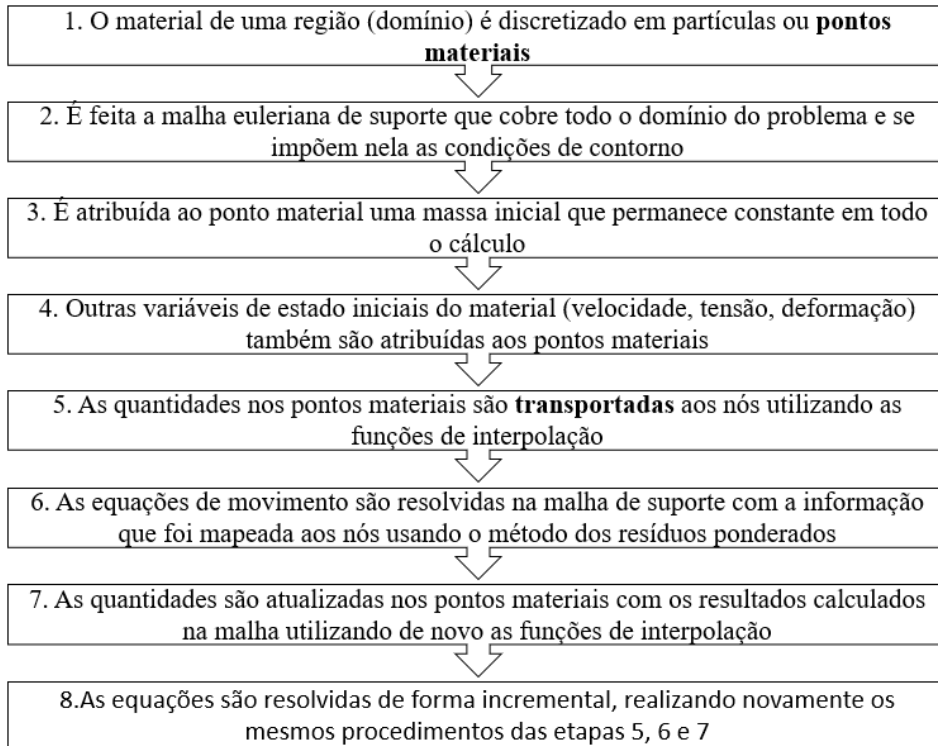


Figura 2. Sequência do MPM (Toro Rojas, 2019)

2.1 Modelos constitutivos

O método do ponto material (MPM) é fundamentado na mecânica dos contínuos, e, portanto, o comportamento constitutivo do material geralmente é formulado dentro da teoria da elastoplasticidade (Yerro et al., 2016). A formulação numérica do MPM permite uma aplicação fácil das leis constitutivas do solo (Abe et al., 2017).

Nos estudos mais recentes, modelos como Mohr-Coulomb e Cam-Clay modificado são amplamente utilizados. No entanto, esses modelos podem ser insuficientes para simular problemas de alta complexidade. Por exemplo, Moorman & Hamad (2015) implementaram uma técnica de suavização de tensões com base na discretização nodal mista no código do MPM e estenderam o algoritmo de contato para permitir a atribuição direta de uma velocidade prescrita a um dos corpos em contato.

Essa abordagem foi utilizada para avaliar um caso real de um fluxo de detritos gerado por um terremoto em Taiwan em 1999. Embora os resultados tenham se aproximado da realidade, o MPM, com sua formulação baseada no contínuo, superestimou o movimento lateral do material ao ser simulado com um modelo constitutivo simples, como o Mohr-Coulomb. Os autores afirmaram a necessidade de utilizar modelos constitutivos mais avançados para obter melhores resultados e aplicar o método a outros problemas de estabilidade de taludes envolvendo materiais diferentes de solo (como rocha).

Portanto, alguns pesquisadores têm implementado outros tipos de modelos em seus códigos, de acordo com os tipos de problemas geotécnicos e os materiais envolvidos. Um exemplo disso foi o estudo de Yerro et al. (2016), que utilizaram um modelo elastoplástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb com amolecimento para simular a fragilidade das massas rochosas. Essa implementação permitiu descrever como

os parâmetros de resistência variam com as deformações plásticas. Essas abordagens mais avançadas visam melhorar a capacidade de modelagem e a precisão dos resultados do MPM em situações desafiadoras.

3 METODOLOGIA

3.1 Definição do modelo

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado o software Anura 3D. Trata-se de uma ferramenta avançada para análise de problemas geotécnicos utilizando o MPM. O software é uma implementação avançada do MPM em formato 3D, projetada para simular a interação complexa entre solo, água e estrutura em problemas de grande deformação. Com uma ampla gama de aplicações, esse software oferece quatro modelos constitutivos diferentes para ajustar as propriedades dos materiais: elástico-linear, Mohr-Coulomb, Mohr-Coulomb suavizado e Cam-Clay modificado.

No presente estudo, adotou-se um modelo constitutivo elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb, amplamente utilizado na análise de problemas geotécnicos. De acordo com a literatura técnica, esse modelo constitutivo é eficaz para descrever o comportamento de materiais como solos e rochas sujeitos a grandes deformações e carregamentos.

A condição considerada para a análise foi a condição drenada/seca, o que implica que não há fluxo de água influenciando o comportamento do material. Segundo Fredlund et al. (2012) a condição drenada é frequentemente aplicada em problemas geotécnicos relacionados a solos e rochas não saturadas.

Além disso, a deformação foi assumida como plana, o que implica que a deformação ocorre apenas em um plano específico do problema em estudo. A análise de deformação plana é comumente aplicada em problemas geotécnicos em que a deformação ocorre predominantemente em uma direção (Das, 2013).

Análise de múltiplas seções é comumente realizada para compreender o comportamento e as variações do material em diferentes pontos do problema em estudo (Bowles, 2001). Contudo, este estudo se restringiu em apresentar a seção mais crítica.

Na base, os deslocamentos foram restringidos em ambas as direções. A Figura 3 apresenta a seção de análise e a Figura 4 a malha inicial e as condições de contorno da seção crítica analisada.

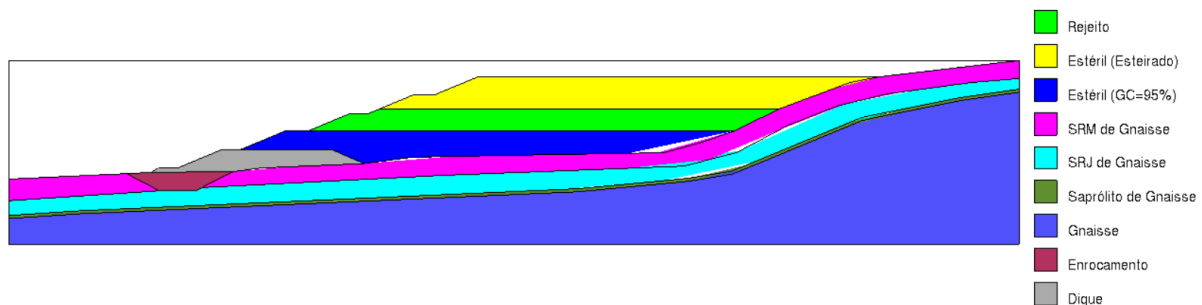


Figura 3. Seção transversal em análise

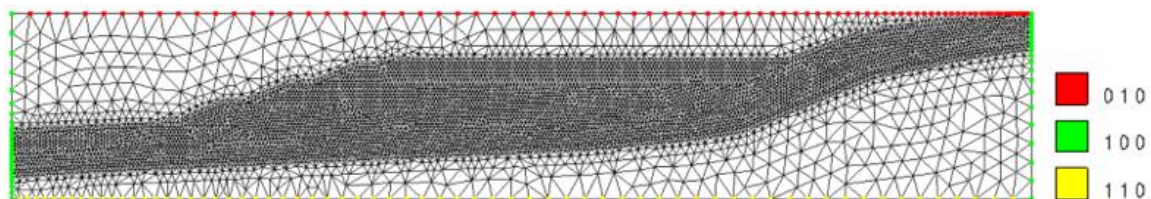


Figura 4. Malha e condição de contorno adotadas na seção crítica.

3.2 Análise de ruptura hipotética

Com a finalidade de avaliar uma possível falha da pilha, foram avaliados três cenários hipotéticos de ruptura. Em todos os cenários, considerou-se a diminuição dos parâmetros de resistência e/ou do módulo de rigidez do dique (componentes que garantem a estabilidade) e/ou do rejeito. A Tabela 1 indica os parâmetros geotécnicos adotados e a Tabela 2 apresenta as especificações da malha adotada. Quanto às condições de contorno, no topo foram restringidos os deslocamentos verticais, enquanto os deslocamentos horizontais foram restringidos nas laterais. A Tabela 3 apresenta os valores verticais em cada hipótese para avaliação da ruptura hipotética.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos iniciais.

Material	γ_n (kN/m ³)	ν	E (kPa)	Mohr-Coulomb	
				ϕ' (°)	c' (kPa)
Dique de Partida	18	0,30	50000	27,5	5
Rejeito	21	0,33	75000	30,0	0
Estéril (Esteirado)	18	0,33	15000	29,1	5
Estéril (GC=95%)	18	0,33	52700	30,7	5
SRM de Gnaiss	20	0,33	30000	24,0	5
SRJ de Gnaiss	20	0,33	80000	28,7	20
Saprólito de Gnaiss	20	0,33	100000	30,0	20
Enrocamento	25	0,30	100000	45,0	0

Tabela 2. Especificações da malha.

Material	Seção crítica
Tipo	Elementos não estruturados triangulares de 3 nós
Elementos	12889
Pontos materiais por célula	6542
Tamanho do elemento	3
Grandes	10m
Pequenos	3m
Refinamentos:	Malha grossa na fundação em rocha (mais resistente) Malha grossa no domínio nas superfícies mais afastadas (onde não se espera movimento) Malha fina nos materiais de menor espessura (Estéril, solos residuais e saprólito) Malha fina no domínio onde se espera movimento (Dique, rejeito compactado, face do talude)

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos iniciais.

Hipótese	Material	E (kPa)	Mohr-Coulomb	
			ϕ' (°)	c' (kPa)
1	Dique de Partida	10000	5	1
	Rejeito	75000*	30*	0*
2	Dique de Partida	10000	5	0
	Rejeito	15000	30*	0*
3	Dique de Partida	10000	5	1
	Rejeito	15000	15	0

* Valores mantidos em relação a Tabela 1

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4 resume os deslocamentos horizontais e verticais do pé do talude, resultante da ruptura hipotética simulada no software.

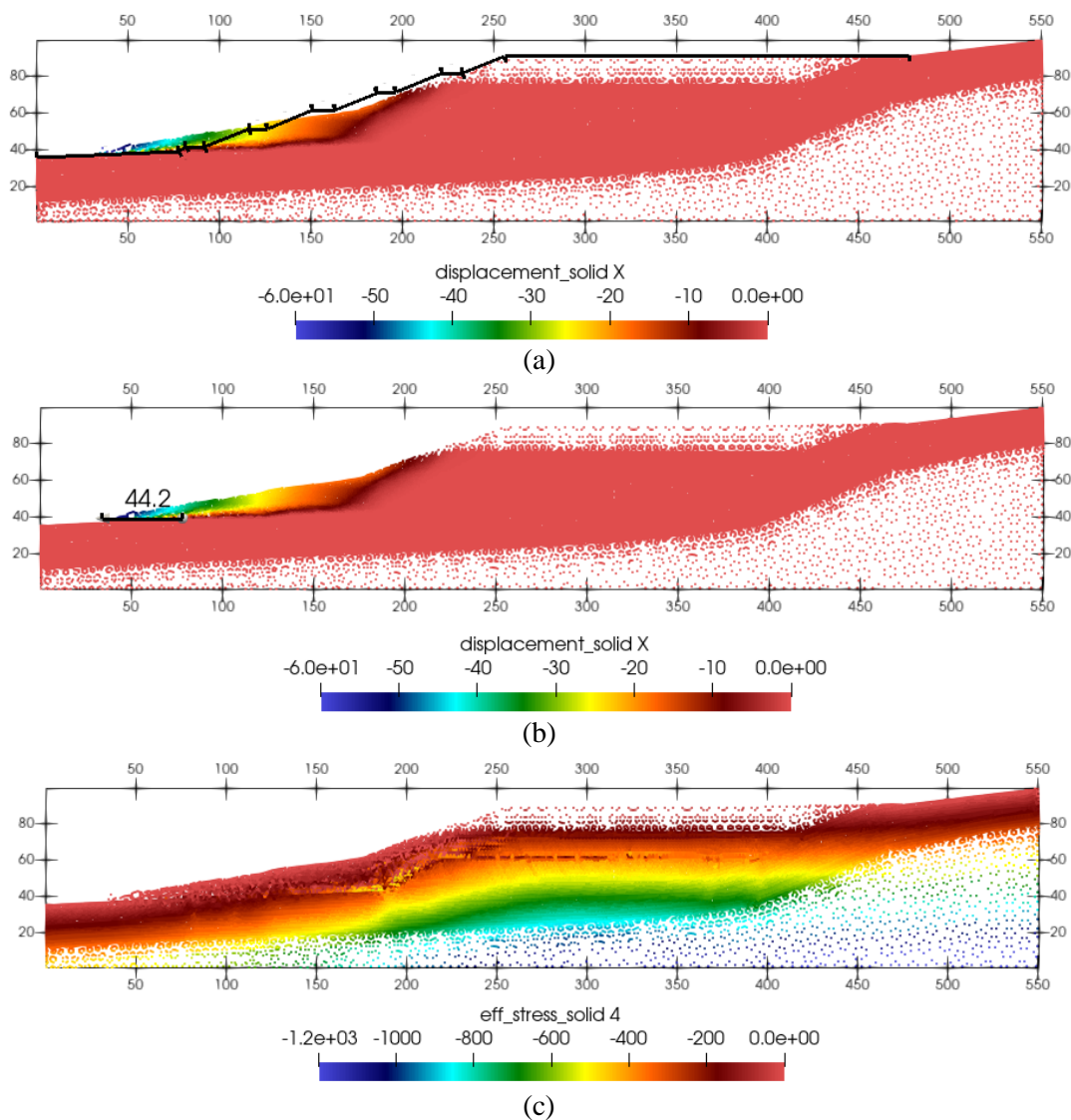
Tabela 4. Deformação horizontal e vertical da seção crítica segundo a ruptura hipotética adotada.

Seção Hipótese Deslocamento (m)

Analísada	Vertical	Horizontal
1	7,90	36,20
2	7,90	36,40
3	10,40	44,20

A Tabela 4 revela que as alterações nos parâmetros geotécnicos realizados nas hipóteses 1 e 2 pouco afetaram o movimento de massa do talude. Em outras palavras, a redução somente do módulo de deformabilidade do material constituinte do rejeito ou do dique de partida pouco afetaram o movimento de massa. Já no caso da hipótese 3, em que os parâmetros de resistência do material constituinte do rejeito foram alterados, nota-se uma evolução singificativa dos deslocamentos, tanto vertical quanto horizontal.

A Figura 5 apresenta alguns outputs do software da seção crítica, considerando a hipótese 3 de parâmetros geotécnicos.



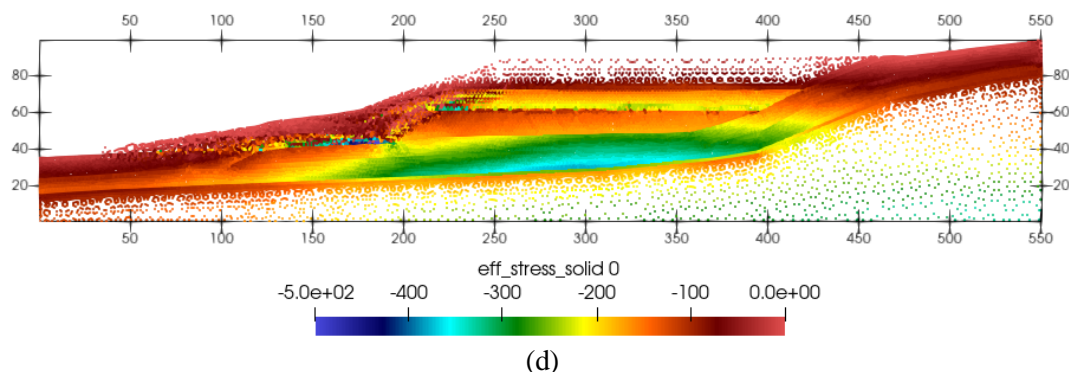


Figura 5. Outputs do software da seção crítica considerando a hipótese 3 de parâmetros geotécnicos: a) comparação da seção transversal final com a inicial, b) distância percorrida pelo deslocamento de massa, c) tensões verticais, e d) Tensões horizontais.

5 CONCLUSÕES

Dada a natureza dos movimentos de massa e seu potencial de causar danos significativos à sociedade, é crucial estimar o deslocamento total da massa de solo. Diante das limitações dos métodos do equilíbrio limite (MEL) e dos elementos finitos (MEF), optou-se pelo uso do método do ponto material (MPM) para analisar a ruptura hipotética de pilhas de estéril, rejeito e estéril-rejeito. Nesse contexto, o software Anura 3D foi empregado para variar os parâmetros de resistência e módulo de elasticidade dos materiais constituintes do dique e do rejeito. Com base nas superfícies hipotéticas de ruptura resultantes, as seguintes conclusões foram alcançadas:

- A revisão bibliográfica destacou que o método do ponto material (MPM), com sua abordagem híbrida lagrangeana-euleriana, é uma alternativa viável para analisar diversos tipos de deslizamentos de forma relativamente simples, com um custo computacional aceitável em comparação com outros métodos, como o método dos elementos discretos;
- O software Anura 3D, especializado em análises geotécnicas usando o MPM, foi identificado como uma ferramenta adequada para este estudo. No entanto, foram observadas algumas instabilidades numéricas que exigem desenvolvimentos no código. Estes problemas podem ser resolvidos por meio de atualizações e novos algoritmos que refinem o método;
- Além dos parâmetros de resistência, como intercepto coesivo e ângulo de atrito, e do módulo de deformabilidade, outros fatores, como peso específico e coeficiente de Poisson, foram investigados. Os testes realizados concluíram que nenhum desses dois últimos parâmetros influenciou diretamente o movimento resultante da massa; e
- O ângulo de atrito, intercepto coesivo e módulo de deformabilidade foram identificados como os principais determinantes da estabilidade de um movimento. Altos valores dessas propriedades resultam em uma maior distância percorrida pela massa instável durante o desenvolvimento do movimento. Em materiais puramente friccionais, observou-se que o movimento se estabiliza quando o ângulo de repouso, que corresponde ao mesmo valor do ângulo de atrito, é alcançado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-KAJAJI, I. (2013). Formulation of a dynamic material point method (MPM) for geomechanical problems. Tese de Doutorado. Stuttgart University, Germany, 261p.
- ABE, K., KONAGAI, K. (2016). Numerical simulation for runout process of debris flow using depth-averaged material point method. *Soils & foundations*. 56 (5), pp 869-888.
- ABE, K., JOHANSSON, J., KONAGAI, K. (2007). A new method for the run-out analysis and motion prediction of rapid and long-traveling landslides with MPM. *JSCEJ. Geotech. Geoenviron. Eng.* 63(1), 93–109.

- COETZEE, C. J., BASSON A. H., VERMEER, P. A. (2006). Discrete and continuum modelling of excavator bucket filling. *Journal of Terramechanics*. 44(2), pp 177-186.
- COETZEE, C. J., VERMEER, P.A., BASSON, A. H. (2005). The modelling of anchors using the material point method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 29(9), pp 879-895. Doi: 10.1002/nag.439.
- Anura 3D® (2017) Anura3D MPM Software – Tutorial Manual. Anura 3D MPM Research Community.
- FATEMIZADEH, F., MOORMAN, C. (2015). Investigation of slope stability problem using the material point method. *International Symposium on Geohazards and Geomechanics (ISGG2015)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 26(1). doi:10.1088/1755-1315/26/1/012019.
- FERN, E. J., DE LANGE, D.A., ZWANENBURG, C., TEUNISSEN, J. A. M., Rohe, A., Soga, K. (2017). Experimental and numerical investigations of dyke failures involving soft materials. *Engineering Geology* 219, pp 130–139.
- JOHANSSON, J., KONAGAI, K. (2007). Fault induced permanent ground deformations: experimental verification of wet and dry soil, numerical findings' relation to field observations of tunnel damage and implications for design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 27(10), 938-956.
- KONAGAI, K., JOHANSSON J., ITOH H. (2004). Pseudo-three dimensional lagrangian particle finite difference method for modeling earthquake induced soil flows. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. No 547.
- LLANO, M., FARIAS, M., MARTINEZ, H. (2015). Numerical modelling of Alto Verde landslide using the material point method. *DYNA* 82 (193), pp. 150-159. Doi:<http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n194.48179>.
- LORENZO, R., CORDÃO, M., PINTO, R. (2013). Material point method for geotechnical problems involving large deformations. *III International Conference on Particle based Method*, Stuttgart, Germany.
- MOORMAN, C., HAMAD, F. (2015). Dynamic simulation in MPM of an seismic-induced sliding mass. *International Symposium on Geohazards and Geomechanics (ISGG2015)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 26(1). doi:10.1088/1755-1315/26/1/012024
- SULSKY, D., CHEN, Z., SCHREYER, H.L. (1994). A particle method for history-dependent materials. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 118, 176–196.
- SULSKY, D., ZHOU, S.J., SCHREYER, H.L., (1995). Application of a particle-in-cell method to solid mechanics. *Comput. Phys. Commun.* 87, 236–252.
- TORO ROJAS, Daniela (2019). Avaliação da influência das propriedades do material na evolução dos movimentos de massa utilizando o método do ponto material. [Distrito Federal] 2019. 140. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
- WIECKOWSKI, Z. (2003). Modelling of silo discharge and filling problems by the material point method. *TASK Quarterly*. 7(4), pp 701-21.
- YERRO, A., ROHE, A., SOGA, K. (2017). Modelling internal erosion with the material point method. *1st International Conference on the Material Point Method*, Delft, Netherlands. *Procedia Engineering*. 175, pp 365-372.
- YERRO, A., ALONSO E.E., Pinyol N. M. (2016). Modelling large deformations problems in unsaturated soils. *E-UNSAT. ES3 Web of Conferences* 9, 08019. Doi: 10.1051/e3sconf/20160908019
- ZABALA, F., ALONSO, E.E. (2011). Progressive failure of Aznalcóllar dam using the material point method. *Geotechnique* 61(9), pp 795–808. Doi: 10.1680/geot.9. P.134