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/COBRAMSEG2026.1/30

Comparativo entre o Método do Ponto Material e Método dos Volumes Finitos em um estudo de ruptura hipotética de pilha

Mikael de Oliveira Nunes da Silva
Consultor Técnico, Fugro Brasil, Pinhais, Brasil, mikael.silva@fugro.com

Vitoria Lima Pfaffenzeller
Consultora Técnica, Fugro Brasil, Pinhais, Brasil, vitoria.lima@fugro.com

Vitor Nascimento Aguiar
Professor, Departamento de Construção Civil (Geotecnia), Escola Politécnica da UFRJ, vitoraguiar@poli.ufrj.br

RESUMO: No Brasil, a estimativa do alcance da corrida de massa é tradicionalmente realizada por modelos hidrodinâmicos baseados nas Equações de Águas Rasas, como o RiverFlow2D, que tratam a massa mobilizada como um fluido equivalente e modelos reológicos aplicáveis, porém sem permitir a representação simultaneamente de materiais com diferentes características. Já o Método do Ponto Material (MPM), ao empregar pontos materiais Lagrangianos em uma malha Euleriana fixa, permite modelar grandes deformações e a interação entre camadas liquefeitas e não liquefeitas, embora com elevado custo computacional. Este trabalho compara o MPM e o Método dos Volumes Finitos (MVF) na simulação de ruptura hipotética de uma pilha de rejeitos suscetíveis à liquefação. A análise considerou um cenário de liquefação estática da camada saturada, simulando no MPM a perda abrupta de resistência da camada de rejeito saturado e a redução de rigidez dos materiais não liquefeitos. No RiverFlow2D, adotou-se o modelo reológico Turbulent & Coulomb, calibrando-se o ângulo de atrito basal para reproduzir o alcance observado no MPM. Para alcançar compatibilidade entre os métodos, foi necessário o aumento do ângulo de atrito basal no RiverFlow2D para incorporar também a perda de energia causada pelo atrito interno do material mobilizado.

PALAVRAS-CHAVE: MPM, Modelagem hidrodinâmica bidimensional, liquefação, ruptura hipotética, corrida de massa.

ABSTRACT: In Brazil, the runout of mass flows is traditionally estimated using hydrodynamic models based on the Shallow Water Equations, such as RiverFlow2D, which treat the mobilized mass as an equivalent fluid with applicable rheological models. However, these models do not allow the simultaneous representation of different materials. The Material Point Method (MPM), in turn, employs Lagrangian material points within a fixed Eulerian mesh, enabling the simulation of large deformations and interactions between liquefied and non-liquefied layers, albeit with high computational cost. This study compares MPM and the Finite Volume Method (FVM) in the simulation of a hypothetical failure of a tailings pile susceptible to liquefaction. The analysis considered a scenario of static liquefaction of the saturated layer, simulating in MPM the abrupt loss of strength of the saturated tailings and the reduction of stiffness in the non-liquefied materials. In RiverFlow2D, the Turbulent & Coulomb rheological model was adopted, with the basal friction angle calibrated to reproduce the runout observed in MPM. To achieve compatibility between the methods, it was necessary to increase the basal friction angle in RiverFlow2D to account for the additional energy loss caused by internal friction within the mobilized material.

KEYWORDS: MPM, bidimensional hydrodynamic modeling, liquefaction, hypothetical failure, run-out.

1 INTRODUÇÃO

Impulsionada pelos acidentes ambientais envolvendo rupturas de barragens de mineração no Brasil — com destaque para o colapso da barragem de Fundão, em Mariana (2015), e da barragem B1, em Brumadinho (2019) —, a técnica de empilhamento a seco de rejeitos filtrados ascendeu como uma alternativa para conferir maior segurança ao processo produtivo (Almeida *et al*., 2025). No entanto, por se tratar de uma estrutura de engenharia complexa, a pilha de rejeitos continua sujeita a incertezas intrínsecas e à probabilidade de falhas, o que torna imprescindível a elaboração do Estudo de Ruptura Hipotética (ERH), frequentemente denominado *Stack Break* ou *Runout Analysis* (Ghahramani *et al*., 2024 e Roman *et al*., 2025).

Apesar da necessidade de gestão de riscos, existe uma lacuna regulatória: enquanto as barragens possuem diretrizes consolidadas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei nº 14.066/2020, além de resoluções específicas para barragens de mineração, como as resoluções ANM nº 95/2022, nº 130/2023, nº 142/2023 e n° 175/2024, ainda não há uma legislação específica para os projetos e estudos de ruptura de empilhamentos drenados. Na ausência de normativas próprias, os conceitos de Dano Potencial Associado (DPA) e os procedimentos aplicáveis a barragens vêm sendo utilizados de maneira análoga para viabilizar as análises dessas estruturas (Roux *et al*., 2024).

Na elaboração de um ERH, é necessário simular o colapso da estrutura e a propagação da massa mobilizada, considerando o cenário possível de maior consequência, conforme a ABNT NBR 17188:2024. Para estruturas de disposição de rejeitos, o cenário mais crítico é, quando crível, a ruptura por liquefação estática ("*flow liquefaction*"), caracterizada pela ocorrência repentina, grande volume de material mobilizado e à baixa resistência residual (pós-liquefação) do rejeito. Dentre os gatilhos hipotéticos para a deflagração da liquefação estática, citam-se o, aumento da superfície freática associada a eventos pluviométricos extremos e/ou falhas do sistema de drenagem interna, abalos sísmicos, ou acréscimo bruscos de carga, resultando em rápida perda de resistência não drenadas. Tais premissas permitem a definição da massa potencialmente mobilizável em um modelo calculado pelo método de equilíbrio limite ou por uma análise tensão-deformação, etapa indispensável para uma posterior simulação da propagação da massa rompida/mobilizada.

Uma vez definida a massa mobilizada, a simulação numérica da corrida de massa permanece um desafio, pois os softwares usualmente empregados, como o RiverFlow2D, são fundamentados em formulações hidrodinâmicas, voltados à propagação de fluidos. Essas aborgagens não reproduzem integralmente o comportamento geotécnico do material, principalmente no que se refere à resistência ao cisalhamento. Os modelos puramente friccionais tendem a superestimar velocidades e alcances, motivo pelo qual formulações mistas (como Voellmy ou Turbulent & Coulomb) são amplamente empregadas em análises de corridas rápidas e escoamentos de detritos (Hungr et al, 2001).

Por outro lado, o Método do Ponto Material (MPM) permite representar interações entre diferentes camadas e estados do material, algo que a maioria dos softwares utilizados para simulação de corrida de massa não reproduz. Além disso, o MPM já demonstrou capacidade de simular deslizamentos reais e ensaios físicos de materiais particulados (Ceccato et al., 2024), o que o torna uma ferramenta robusta para comparação com modelos hidrodinâmicos simplificados. Assim, a avaliação conjunta entre MPM e RiverFlow2D permite compreender as limitações, convergências e diferenças entre as duas abordagens em estudos de ruptura hipotética de estruturas de armazenamento de rejeitos de mineração.

2 FORMULAÇÃO TEÓRICA

2.1 RiverFlow2D

O *RiverFlow2D* consiste em um modelo numérico hidrodinâmico bidimensional com base nas Equações de Águas Rasas (*Shallow Water Equations*), derivadas da integração vertical das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento de fluidos. Nesse procedimento, assume-se que a espessura da camada de fluxo é pequena em comparação às dimensões horizontais de propagação, dispensando a necessidade de calcular variações verticais de velocidade ou tensões. Para simulações de escoamentos de fluidos hiperconcentrados (com elevada concentração de sólidos), o *software* dispõe do módulo *Mud and Tailings Flow* (MT), que permite representar diferentes formulações de reologia e/ou tensões na base da camada, seja

com propriedades constantes ou variáveis (Hydronia, 2025). Este é o módulo que vem sendo normalmente utilizado para simular corridas de massa de rejeitos de mineração.

Como consequência dessa integração, toda a resistência ao movimento é concentrada em um termo de atrito basal, aplicado diretamente na interface entre o fluxo e o terreno. Assim, os efeitos de fricção interna, colisões entre grãos e tensões anisotrópicas ao longo da profundidade são tratados de forma agregada, convertidos em um único mecanismo de dissipação da quantidade de movimento.

Uma das formulações aplicáveis para fluxos de rejeitos arenosos no módulo MT é o modelo Turbulent & Coulomb, que combina um termo friccional com um termo turbulento. A resistência ao cisalhamento basal (τ_b) é dada por:

$$\tau_b = \tau_f + \rho g_\psi \frac{n^2 |u|^2}{h^{1/3}} \quad (1)$$

Onde o ρ: é a densidade do material (kg/m³); g_ψ: a projeção da gravidade em relação ao leito (m/s²); n: rugosidade de Manning ($m^{-1/3}$.s); $|u|$: módulo da velocidade (m/s); h: espessura do escoamento; e o termo friccional (τ_f) é dado pela Equação (2):

$$\tau_f = (\rho g_\psi h - P_b)\tan\delta_f \quad (2)$$

Nessa formulação, P_b é a poropressão na base, que para o caso de parâmetros constantes é igual à pressão hidrostática e δ_f representa o atrito basal. Embora o manual da *Hydronia* (2025) utilize a nomenclatura "ângulo de atrito interno", esse parâmetro é aplicado exclusivamente na interface com o terreno, e não como fricção interna ao longo da coluna de fluxo. Já o termo turbulento, proporcional ao quadrado da velocidade, representa as perdas de energia por turbulência, importantes em escoamentos rápidos.

2.2 MPM

O Método dos Pontos Materiais (MPM) é um método que descreve o meio através de pontos Lagrangianos, os quais se movem através de uma malha Euleriana. Os pontos materiais carregam as propriedades físicas do meio contínuo e parâmetros de estado, enquanto as equações de equilíbrio de momentos e energia são resolvidas na malha computacional. Esta formulação é particularmente útil em análises de grandes deformações, uma vez que não sofre de problemas de distorção de malha, como é o caso de análises de elementos finitos, dado o uso de uma malha Euleriana (fixa).

No MPM, o meio contínuo pode ser descrito através de diferentes formulações: *one-phase single-point*, *two-phase single-point*, *three-phase single-point* ou *two-phase double-point*, a depender da interação das fases sólida, líquida e gasosa do meio. Neste estudo, foi utilizada a formulação *one-phase single-point*, a qual discretiza o material através de um único conjunto de pontos, com uma única fase homogênea. Este tipo de formulação pode ser utilizado em casos de líquidos e solos secos ou saturados, de comportamento francamente drenado ou não drenado, não se aplicando a comportamento parcialmente drenado (Fern et al., 2019).

A energia do movimento pode ser dissipada através de alguns mecanismos: atrito interno, atrito com a base e força de arrasto (para casos multifásicos), além de amortecimentos numéricos, como *Local Damping* e *Artificial Bulk Viscosity*. O modelo constitutivo tem grande relevância na dissipação de energia durante o movimento.

O movimento no momento t^k é controlado pela conservação do momento linear, dada pela Equação (3):

$$\vec{a}^k = [\boldsymbol{M}^k]^{-1}\left(\vec{f}^{ext,k} - \vec{f}^{int,k}\right) \quad (3)$$

onde $\vec{a}^k$ é o vetor aceleração no nó, $\boldsymbol{M}^k$ é a matriz de massa, $\vec{f}^{ext,k}$ são as forças externas e $\vec{f}^{int,k}$ são as forças internas, sendo que esta última é função, em última análise, do modelo constitutivo.

O MPM permite simular a deflagração da ruptura e a corrida de massa na mesma análise. No momento em que há um desequilíbrio entre as forças externas e internas, o movimento se inicia. Como o modelo constituitivo de Mohr-Coulomb considera uma relação elasto-plástica perfeita, durante a fase elástica, a energia é armazenada porém não dissipada, sendo que a dissipação se inicia somente na fase plástica, gerando trabalho mecânico plástico ao se opor ao movimento. Esta desconsideração de perda de energia durante a fase plástica somente torna-o conservador neste tipo de análise, ao superestimar distâncias de *run-out*.

Ainda de acordo com Fern *et al.* (2019), a segunda forma de perda de energia é proveniente do atrito com o terreno sobre o qual ocorre a corrida de massa. No MPM, esta consideração é feita através de formulações de contato. Quando esta formulação não está ativada, o campo de velocidades de ambos os nós

em contato é o mesmo, fazendo que não haja deslizamento entre as camadas, formado um cone estático pela ruptura das camadas internas do material em movimento, com um fluxo do tipo *top-down*, onde o topo da camada flui sobre a base imobilizada. Já no caso onde a formulação de contato é ativada, o delizamento ocorre quando a força tangencial máxima permitida é superada, seguindo o critério de Coulomb (Equação (4)):

$$f_{tan,max}^{t+\Delta t} = af A_k^t + \mu \left\| f_{norm}^{t+\Delta t} \right\| \quad (4)$$

onde af é o fator de adesão, A_k^t é a área de contato, μ é o coeficiente de atrito e $\left\| f_{norm}^{t+\Delta t} \right\|$ é a força normal à superfície. Para solos não plásticos, o fator de adesão (af) pode ser considerado nulo, uma vez que estes materiais transferem forças tangenciais apenas por atrito. Já o coeficiente de atrito (μ) corresponde à tangente do ângulo de atrito da interface.

Por fim, há artifícios numéricos para amortecimento artificial do movimento. O primeiro é o *Local Damping*, o qual é constituído por uma força aplicada aos nós da malha, que é proporcional à força de desequilíbrio, porém em sentido contrário. Em problemas dinâmicos ele pode ser utilizado para mimetizar a dissipação de energia quando modelos constitutivos mais simples são utilizados, como o caso de Mohr-Coulomb. Já o segundo artifício numérico para amortecimento é o *Artificial Bulk Viscosity Damping*, sendo utilizado para mitigar oscilações numéricas em casos de propagação de ondas de choque (Fern et al., 2019).

3 METODOLOGIA

Para comparar as duas abordagens de avaliação de corrida de massa, foi realizada a simulação da ruptura hipotética de um empilhamento drenado, composto majoritariamente por rejeitos provenientes do beneficiamento de minério de ferro. A estrutura é composta por um dique de partida de solo compactado, com filtro vertical e tapete drenante horizontal, de altura aproximada de 55 m e declividade entre bermas de 2:1 (H:V). A altura total do empilhamento é de 106 m, com volume total de 20,8 Mm³.

A superfície freática foi inicialmente definida com base na interpretação conjunta das leituras máximas de piezômetros e medidores de nível d'água, sondagens e ensaios de piezocone (CPTu), além de investigação geofísica por imageamento elétrico, realizada na área. Porém, no contexto de um estudo de ruptura hipotética, de maneira conservadora, foi considerada a possibilidade de ocorrência de uma anomalia no funcionamento do sistema de drenagem interna da estrutura e/ou de um aporte inesperado de água para dentro da estrutura, decorrente de chuva intensa não prevista no dimensionamento do sistema de drenagem interna, o que levou à transladação de 10 m acima da superfície freática inicialmente definida.

A jusante da pilha, encontra-se o reservatório de uma barragem construída para conter os sedimentos erodidos da bacia hidrográfica a montante, bem como para o armazenamento de água proveniente de processos industriais. A Figura 1 apresenta a geometria em planta e seção do empilhamento drenado e do reservatório da barragem de contenção de sedimentos.

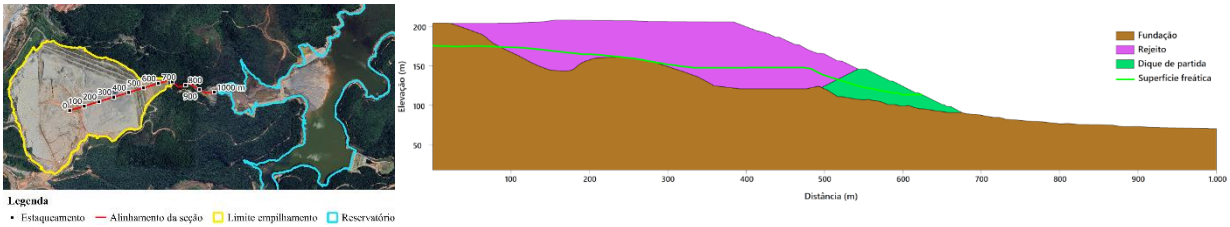


Figura 1 – Vista em planta e seção do empilhamento drenado e do reservatório a jusante

A partir da interpretação de todos os ensaios CPTu executados no empilhamento, que indicaram comportamento majoritariamente contrátil das camadas de rejeito submerso, o modo de falha considerado para a estrutura foi a liquefação estática ("*flow liquefaction*") de todo o volume de rejeito (não plástico) submerso/saturado, isto é, situado abaixo da superfície freática definida no modelo (Figura 1). Não foi objeto de estudo a probabilidade de ocorrência da liquefação, tampouco os gatilhos que poderiam causar este fenômeno. Os parâmetros geotécnicos atribuídos aos materiais constituintes do modelo foram definidos ora com base nos ensaios de campo e laboratório realizados nos materiais do empilhamento, tomando-se a

profundidade média da camada como referência, ora com base na experiência dos autores em estudos de outras estruturas semelhantes, apresentados na Tabela 1.

Na modelagem em MPM, foi utilizado o *software* Anura3D (Anura, 2024) em conjunto com o *software* GiD v. 16.0.7 como pré-processador, em uma análise bidimensional devido ao alto gasto computacional necessário para uma simulação 3D. O domínio do modelo foi discretizado por uma malha triangular com tamanho médio de 13,3 m, com 3 pontos materiais por elemento ativo, resultando em 6.786 pontos, aplicando a formulação *one-phase single-point* para todos os materiais. As tensões in situ foram geradas por um carregamento *quasi* estático em um único *time step*. Durante a fase de ruptura/mobilização e runout, foi utilizado um *local damping* de 0,03 (Ceccato et al., 2024). Não foi aplicado nenhum algoritmo de contato na interface entre diferentes materiais.

Todos os materiais localizados acima da superfície freática foram modelados como material seco, o volume do dique de partida abaixo da superfície freática foi modelado como saturado e com comportamento drenado, ao passo que todo o rejeito abaixo da superfície freática foi modelado como saturado, porém com comportamento não drenado. A todos os materiais secos e saturados foi atribuído o modelo constitutivo Mohr-Coulomb. Na fase de definição de tensões iniciais, foram atribuídos uma resistência não drenada de pico ($S_{u,pico}$) para o rejeito submerso e valores de módulo de deformabilidade iniciais (E_i) para todos os materiais, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros geotécnicos dos materiais

Material	n	ρ_s (g/cm³)	ν	E_i (MPa)	E_f (MPa)	c' (kPa)	φ' (°)	$S_{u,pico}$ (kPa)	$S_{u,liq}$ (kPa)
Rejeito seco	0,50	3,11	0,30	180	8	0	30	-	-
Rejeito saturado	0,50	3,11	0,49	395	1	-	-	216	35
Dique seco	0,38	2,67	0,30	30	2	5	32	-	-
Dique saturado	0,38	2,67	0,30	50	4	5	32	-	-
Fundação	0,30	2,80	0,30	450	450	100	45	-	-

Legenda: n: porosidade; ρ_s: massa específica dos sólidos; ν: coeficiente de Poisson; E_i: módulo de deformabilidade inicial; E_f: módulo de deformabilidade secante após grandes deformações; c': intercepto de coesão efetivo; φ': ângulo de atrito efetivo; $S_{u,pico}$: resistência não drenada de pico; $S_{u,liq}$: resistência não drenada "liquefeita".

A liquefação da camada de rejeitos submersos foi simulada através da perda abrupta de resistência dos materiais, reduzindo do valor de pico/inicial para o seu valor liquefeito/final (ver Tabela 1), tal como procedido por Yerro et al. (2018). Esta fase foi simulada por 150 s em 300 passos de tempo de 0,5 s cada.

Como a simulação utilizando MPM foi desenvolvida em 2 dimensões, foi realizada uma outra análise, utilizando o *software* RiverFlow2D, com o objetivo de estimar o espraiamento em planta da propagação do volume de rejeito mobilizado na ruptura, chamada de "mancha de ruptura" em estudos de ruptura hipotética.

Para realizar a simulação no *software* RiverFlow2D v08.15.05 (Hydronia, 2025) foi necessária, primeiramente, a definição do volume mobilizável, uma vez que o *software* simula apenas a corrida de massa ("*runout*") de um volume previamente definido. Por se tratar de uma análise 2D em planta (*depth-average*), a cunha de ruptura precisa ser definida em uma análise de estabilidade 3D. Para isto foi utilizado o *software* Slide3 (v 3.023), da Rocscience, que aplica o Método de Equilíbrio Limite (MEL). Os materiais foram os mesmos apresentados na Figura 1 e na Tabela 1, porém com $S_{u,liq}$ para o rejeito submerso e a fundação como impenetrável para as superfícies de ruptura. Como critério para seleção da superfície de ruptura, adotou-se aquela que forneceu o maior volume de material mobilizado e cuja geometria mais se assemelhou à obtida na simulação em MPM dentre todas aquelas que forneceram fator de segurança menor ou igual a 1,3 obtido pelo método de Spencer.

Após a definição da superfície de ruptura e do correspondente volume mobilizado, a corrida de massa foi simulada no *software* RiverFlow2D, utilizando o módulo *Mud and Tailings Flow*, aplicando o modelo *Turbulent and Coulomb* para cálculo da resistência basal, com parâmetros constantes. Todo o volume mobilizado foi representado como um único material "fluido", dada a limitação do *software* em representar diferentes materiais, impossibilitando discretizar o rejeito saturado (liquefeito) do rejeito não saturado, e dique saturado e não saturado. Sendo assim, atribuiu-se a todo volume mobilizado um valor de massa específica

correspondente à média ponderada dos valores de todos os materiais envolvidos na corrida (composição de material acima e abaixo do N.A), resultando em 1.871 kg/m³. Os coeficientes de rugosidade de Manning foram definidos com base na análise e na classificação do uso e da cobertura do solo do vale de jusante.

A simulação no RiverFlow2D não considerou mobilização de volume do terreno natural ao longo do percurso da corrida. Por fim, foram também avaliados diferentes valores de ângulo de atrito basal (δ_f), de modo a fazer um estudo de sensibilidade e comparar com o alcance apresentado pela simulação no MPM 2D.

4 RESULTADOS

Na análise do MPM (2D), o foco principal foi a obtenção do alcance da corrida de massa e da geometria final do volume mobilizado. A Figura 2 apresenta a comparação entre a superfície final de deposição, representada pelos pontos materiais, e a geometria inicial, representada pelo preenchimento cinza. Nela é possível observar que o dique de partida sofreu deformações, contudo, sem se propagar muito a jusante. O material propagado é composto principalmente pelos rejeitos acima do N.A. misturados com rejeitos abaixo do N.A., e apresentou um alcance máximo de aproximadamente 70 m em relação ao pé do dique de partida em seu instante inicial. É possível observar duas inclinações diferentes no material depositado, sendo uma na região a montante, mais branda, do rejeito que se manteve dentro da cunha de ruptura, e uma segunda, mais a jusante, do material depositado sobre o dique de partida, com inclinação governada pela declividade do talude do dique.

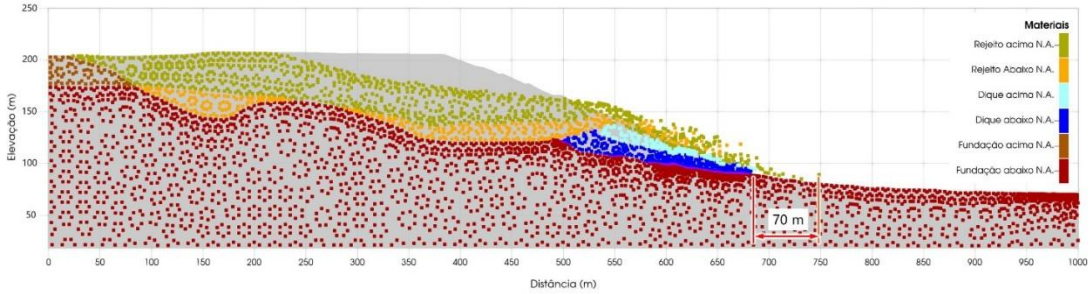


Figura 2 – Geometria da deposição final do volume mobilizado obtida na modelagem MPM

Ao comparar as superfícies de ruptura obtidas na análise MEL (3D) com a região mobilizada na análise MPM (2D), observou-se que não havia uma única superfície na análise MEL (3D) que atendesse aos critérios pré-estabelecidos e cobrisse toda a extensão mobilizada observada na análise MPM (2D). Portanto, foi realizada a combinação de duas superfícies de ruptura, considerando a ocorrência de ruptura retrogressiva. A Figura 3 apresenta a geometria rompida obtida na análise MPM (2D) em conjunto com as superfícies de ruptura obtidas nas análises MEL (3D) na seção analisada. Este processo resultou em um volume mobilizado de 2,9 Mm³, correspondendo a 13% do volume total do empilhamento.

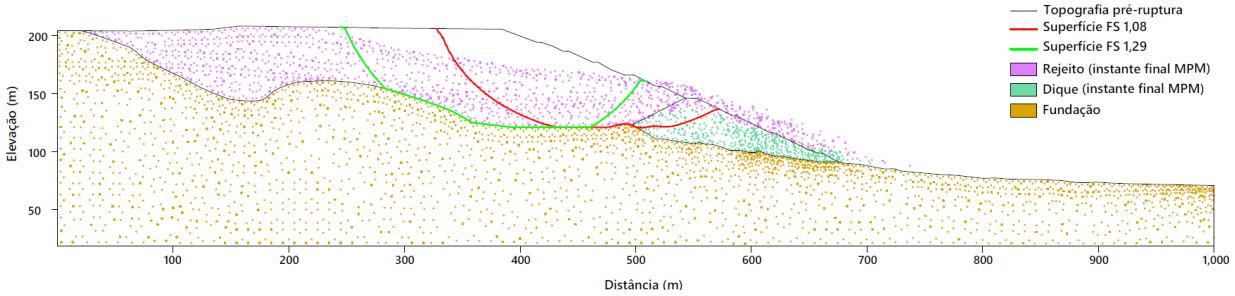


Figura 3 – Comparação entre a região mobilizada na análise MPM (2D) com as superfícies de ruptura obtidas na análise MEL (3D)

De posse da geometria do volume mobilizável obtida na análise MEL (3D), foi realizada a modelagem da corrida de massa no RiverFlow2D. Como mencionado anteriormente, foram realizadas análises com distintos ângulos de atrito basais (δ_f), de modo a fazer um estudo de sensibilidade e comparar com o alcance

apresentado pela simulação no MPM (2D). A Figura 4 apresenta a comparação entre os resultados obtidos no MPM 2D, representados pelos pontos materiais, e no RiverFlow2D, representados pelas linhas verde, azul e vermelha, que são as superfícies do material depositado para diferentes valores de δ_f.

Para um $\delta_f = 30°$ (linha vermelha), a parcela de material mobilizado que permaneceu dentro da cunha de ruptura apresentou declividade semelhante à modelagem usando MPM (2D), na mesma região, porém apresentou um alcance total bastante superior ao do MPM (2D), na ordem de 300 m em relação ao pé do dique de partida. Já no outro extremo, para um $\delta_f = 40°$ (linha verde), a declividade do material remanescente dentro da cunha de ruptura obtida no RiverFlow2D foi superior àquela obtida no MPM (2D) na mesma região. Neste caso, o alcance da mancha obtido no RiverFlow2D ficou próximo ao obtido no MPM (2D), aproximadamente 130 m em relação ao pé do dique de partida. Em nenhum dos casos, o reservatório a jusante é impactado pela ruptura do empilhamento.

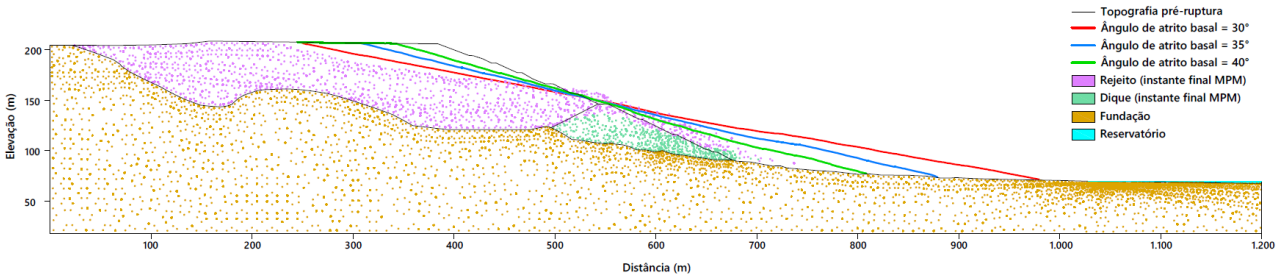


Figura 4 – Comparação entre resultados MPM e RiverFlow2D

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme apresentado, as duas abordagens de modelagem de ruptura/mobilização e corrida de massa apresentam diferenças relevantes entre si. Primeiramente, a modelagem em MPM apresenta dois ângulos de deposição distintos, sendo que o material remanescente na cunha de ruptura se estabilizou com um ângulo de aproximadamente 8° com a horizontal, enquanto o material depositado sobre o talude do dique de partida apresentou um ângulo médio de 22°, condicionado pela declividade do talude do dique.

Já no RiverFlow2D não se observou variação no ângulo do material depositado em função da inclinação da camada sobre a qual o material se apoia. As diferenças de declividade do material depositado observadas entre as simulações são justificadas pela variação do ângulo de atrito basal (δ_f) adotada em cada simulação. O ângulo do material depositado variou entre 11° e 14°, para o menor e maior valor de δ_f, respectivamente. Estes ângulos estão compatíveis com os apresentados por Hawley e Cunning (2017).

Cada modelagem no RiverFlow2D apresenta declividade constante de deposição por se tratar de um único material propagado. Assim, em uma única análise, não foi possível capturar simultaneamente a abrangência do material mobilizado dentro da pilha e o alcance a jusante observado na análise MPM, considerada mais representativa. Por consequência, torna-se necessário optar por mobilizar efetivamente todo o volume da cunha de ruptura ou ajustar o alcance final da mancha ao observado no MPM.

É notório que a modelagem MPM apresentou alcance menor que a modelagem utilizando RiverFlow2D. Como apresentado no item 2, um dos motivos para isto é o fato do RiverFlow2D não considerar dissipação de energia através de atrito interno do material propagado, mas tão somente através do atrito entre a base da camada e a topografia. Por se tratar de ruptura de materiais com comportamento de solo e não de fluidos, ainda que hiperconcentrados, o atrito interno desempenha um papel relevante na desaceleração do movimento, tornando o RiverFlow2D demasiadamente conservador ao desconsiderar este fenômeno. Nestes casos em que o material mobilizado apresentará comportamento geotécnico e não de fluido, o MPM se mostra mais adequado para a modelagem de corrida de massa.

É importante destacar que a modelagem MPM não fez uso de algoritmo de contato, uma vez que a definição dos parâmetros envolvidos depende de realização de ensaios específicos para a interface e/ou retroanálises de casos reais, e o uso arbitrário de valores de coeficiente de atrito agrega incertezas adicionais. O uso de algoritmo de contato pode aumentar ou reduzir o alcance da corrida a depender dos parâmetros

considerados (Fern *et al.* 2019). Há também a limitação quanto ao modelo constitutivo utilizado (Mohr-Coulomb), que é muito simplista para representar o real comportamento dos materiais envolvidos na corrida.

Apesar das diferenças encontradas entre os resultados das duas abordagens adotadas para avaliação da corrida de massa, em nenhum dos casos simulados, o material mobilizado atinge o reservatório da barragem a jusante, mesmo em seu nível d'água máximo *maximorum*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. *NBR 17188: Barragens – Ruptura Hipotética – Diretrizes*. Rio de Janeiro, ABNT, 2024.

Almeida, M. S. S.; Schnaid, F.; Silva, R. S. A.; Becker, L. D. B.; Delgado, B. G.; Souza Junior, A. J. P.; Oliveira, F. W. A.; Cavalcanti, M. C. R.; Nagula, S. S. (2025). *Toward sustainable tailings disposal: a geotechnical overview of Brazilian research.* Soils and Rocks, São Paulo, v. 48, n. 3, p. e2025011624. DOI: https://doi.org/10.28927/SR.2025.011624.

Anura3D MPM Research Community (2024) Anura3D Version 2024 Source Code, www.anura3d.com.

Ceccato, F., Yerro, A., Di Carluccio, G. (2024) Simulating landslides with the material point method: Best practices, potentialities, and challenges, *Canadian Geotchnical Journal*, Volume 56, Number 9, Elsevier B.V., (March 26, 2025, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379522400214X).

Fern, J., Rohe, A., Soga, K., Alonso, E. (2019) *The material point method for geotechnical engineering: a practical guide*, 1st Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group.

Ghahramani, N., Adria, D.A.M., Rana, N.M., Llano-Serna, M., McDougall, S., Evans, S.G., Take, W.A. (2024) Analysis of Uncertainty and Sensitivity in Tailings Dam Breach-Runout Numerical Modelling. *Mine Water and the Environment*, 43, p.87-103.

Hawley, M. and Cunning, J. (ed.). (2017) Mine Waste Dump and Stockpile Design. *Leiden: CRC Press/Balkema*, 370p.

Hawley M., Cunning J. (ed.). (2017). *Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design*. Leiden: Crc Press/Balkema, 369 p.

Hungr, O.; Evans, S.G.; Bovis, M.J.; Hutchinson, J.N. (2001). *A review of the classification of landslides of the flow type.* Environmental & Engineering Geoscience, 7(3), 221–238.

Hydronia (2025). RiverFlow2D Two-Dimensional Flood and River Dynamics Model. *Reference Manual. Hydronia LLC*.

Roman, B., Barreto, A., Villanueva, M. (2025) Assessment of the Run-Out Distance of Filtered Dry Stack Tailings Using the Material Point Method. *Technical Talk – Tailings and Mine Waste Conference.*

Roux, K., MacRobert, C., Roux, N. (2024) Preliminary framework for filtered tailings deposition design considerations: a South African perspective. *Australian Centre for Geomechanics – Paste 2024*

Yerro, A., Soga, K., Bray, J. (2018) *Runout evaluation of the Oso Landslide with the Material Point Method*, Engineering Geology, Volume 338, (March 26, 2025, https://cdnsciencepub.com/doi/abs/10.1139/cgj 2017-0630).