

Estudo Hipotético de Ruptura em Pilhas De Estéril – Estudo de Caso

Jeferson Silva Machado

Engenheiro, Faculdade Arnaldo, Belo Horizonte, Brasil, jsm.engenharia@hotmail.com

Marcio Fernandes Leão

Geólogo-Geotécnico, Tractebel/UFV, Belo Horizonte, Brasil, marciotriton@hotmail.com

RESUMO: Os estudos de ruptura hipotética de pilha são importantes para projetos de mineração, tendo como finalidade simular a ruptura/escorregamento da pilha, podendo mapear possíveis impactos que a ruptura gerará e identificar também possíveis riscos. O objetivo do presente artigo, foi a partir de uma pilha de estéril (caso de estudo), quantificar a ruptura, pela verificação do dano potencial e seus possíveis impactos, viabilizando a gestão do risco. Foi realizado o levantamento de dados da pilha necessários para simular a ruptura hipotética. Assim, a metodologia contemplou: a setorização dos pontos críticos, definição da inclinação do terreno à jusante e estimativa do volume e altura da massa obtida pelas superfícies de ruptura. As análises de estabilidade objetivaram determinar os fatores de segurança (FS) para os taludes da PDE, a partir de premissas de projeto. Os resultados identificaram duas manchas de rupturas possíveis, com a mancha de ruptura 1, com alcance de aproximadamente 1.390 m e, a mancha de ruptura 2 apresentou alcance de aproximadamente 270 m, com consequências diversas. Conclui-se que, a classificação, o uso e ocupação, bem como a matriz de gestão de risco desenvolvidas em projetos dessa natureza devem ser avaliados em concordância com os estudos de Stack break buscando avaliar os impactos da pilha em regiões que apresentem interferência.

PALAVRAS-CHAVE: Ruptura hipotética, Estéril, Risco.

ABSTRACT: Stack break rupture studies are important for mining projects, with the purpose of simulating pile rupture/slippage, being able to map possible impacts that the rupture will generate and also identify possible risks. The objective of this article was, using a pile of waste rock (case study), to quantify the rupture, by verifying the potential damage and its possible impacts, enabling risk management. Data collection from the pile necessary to simulate a hypothetical rupture was carried out. Thus, the methodology includes: the sectorization of critical points, definition of the specification of the terrain downstream and estimation of the volume and height of the mass obtained by the rupture surfaces. Stability analyzes objectively determined the safety factors (FS) for the PDE slopes, based on design assumptions. The results identified two possible rupture spots, with rupture spot 1, with a range of approximately 1,390 m and, rupture spot 2, with a range of approximately 270 m, with different consequences. It is concluded that the classification, use and occupation, as well as the risk management matrix developed in projects of this nature, must be evaluated in accordance with Stack break studies seeking to evaluate the impacts of the stack in regions that present interference..

KEYWORDS: Stack break, Waste, Risk.

1 INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de uma pilha de estéril, em etapa conceitual, o projeto passa por distintas etapas para que seja concebido, ou seja: a análise topográfica da região de implantação, o mapeamento geológico-geotécnico, as investigações geológico-geotécnicas (sondagens e ensaios), o estudo de viabilidade do arranjo geométrico e o estudo do material que incorporará a estrutura. Posteriormente é definido o arranjo da pilha, o sequenciamento construtivo, o estudo de estabilidade da estrutura, o posicionamento e dimensionamento de estrutura de contenção de sedimento, o estudo de rompimento de barragem (*Dam break*), caso pertinente e por fim, mas não menos importante o estudo de ruptura da pilha de estéril (*Stack break*).

Os estudos de ruptura hipotética da pilha tem a finalidade de simular a ruptura/escorregamento dos materiais que compõem a pilha, por meio de superfícies preferenciais (TROCONE et al., 2020; RISELO et al., 2023). Nesse contexto, é possível identificar possíveis impactos que a massa mobilizada poderá gerar

mapeando associados a riscos de qualquer natureza, conforme trabalhos de Corominas (1996) e Hunter & Fell (2003). Esse tipo de análise não indica a possibilidade de ocorrência e tampouco a probabilidade de ruptura, e sim identifica áreas potencialmente impactadas no caso de uma ruptura. Além disso, para pilhas devem ser consideradas as opções de rupturas translacionais e escorregamento de terra sempre que não for possível caracterizar previamente a cunha de ruptura. Neste caso, deve-se adotar de forma conservadora o resultado de maior magnitude. Mesmo assim, no caso de terrenos a jusantes com grandes inclinações, devem ser consideradas também a opção de fluxo de detritos. Essas questões foram observadas por Hunter & Fell (2003) em Stack Breaks utilizando um banco de dados com cerca de 350 deslizamentos de terra “rápidos”, em taludes predominantemente de solo.

No método de Corominas (1996) são considerados critérios geométricos, onde o volume de material a ser mobilizado (V) deve ser estimado a partir da cunha de ruptura obtida em análise de estabilidade (cunha de ruptura com o menor Fator de Segurança comparada com as demais seções analisadas) e superfície em planta semicircular. A análise da ruptura pelo método de Corominas (1996) deve ser analisada sob 4 tipos, ou seja:

- Queda de blocos: no qual ao menos parte do trajeto da “massa corrida” ocorre em queda livre;
- Rupturas translacionais: em que a massa é deslocada principalmente por cisalhamento basal, enquanto os materiais transladados mantêm a sua ordem estratigráfica nos depósitos de deslizamento com pouca perturbação;
- Deslizamento de terra: o qual a superfície rompida é “abaloadada” e os materiais envolvidos são considerados como coesivos ou altamente fraturados. O mecanismo do movimento envolve fluxo e/ou múltiplas rupturas; e
- Escorregamento/fluxo de detritos: no qual um material fragmentado e/ou sem coesão flui através de um canal ou em uma camada de pequena espessura, ou por um terreno à jusante com elevada inclinação.

Para cerca de 100 casos, Hunter and Fell (2003) afirmam que havia dados razoavelmente detalhados e disponíveis em relatórios ou artigos publicados em conferências e periódicos, incluindo na sua maioria seções e planos. A partir desses trabalhos foi possível a obtenção de informações quantitativas sobre a geometria do deslizamento de terra, incluindo: a distância do deslocamento, a altura do deslizamento de terra, o ângulo da distância de deslocamento, o ângulo de inclinação da área de origem e os ângulos de descida. Nos dados analisados foi possível a identificação de variáveis como: tipos de declive e material, a Geologia, a Geomorfologia e o próprio deslizamento de terra. Já os outros 250 deslizamentos utilizados no estudo apresentavam menor número de informações, one basicamente havia uma breve descrição do fenômeno. Hunter & Fell (2003) discutem ainda as características dos solos, tanto dilatantes quanto contrativos no cisalhamento inicial, bem como as condições do declive para as quais os deslizamentos de terra são suscetíveis ao desenvolvimento de deslizamentos de velocidade “rápida” pós-falha. Os autores desenvolveram em seu estudo métodos para estimar o ângulo da distância de deslocamento da massa do deslizamento após a falha, com base na consideração da mecânica de falha do deslizamento inicial. Assim, foi possível relacionar: características (contrativa ou dilatante no cisalhamento inicial) do solo, o tipo de declive, o volume do deslizamento, a geometria do declive na área de origem do deslizamento e abaixo dela e no grau de confinamento da mancha (deslocamento do deslizamento). Hunter & Fell 2003 ainda abordaram em suas análises quanto a susceptibilidade ao fluxo: a identificação e mecânica de falha dos solos contrativos suscetíveis à liquefação, o tamanho das partículas e a densidade relativa.

Assim, o objetivo do presente artigo, foi a partir de uma pilha de estéril (caso de estudo), quantificar a ruptura, pela verificação do dano potencial e seus possíveis impactos, pelos métodos Corominas (1996) e Hunter & Fell (2003) .

2 METODOLOGIA

Inicialmente, foram consolidados todos os elementos que compõem a pilha de estéril (PDE) buscando a identificação de todas as interferências que essas pudessem ser controladas ou eliminadas da influência da ruptura.

A estrutura apresenta altura de aproximadamente 403 m, largura das bermas de 10 m, altura dos bancos de 20 m, com área de 2,07 Mm² e volume em torno de 186 Mm³. Para jusante foi simulado um barramento com as seguintes características: capacidade volumétrica da barragem com 638 mil m³, área de ocupação

representada por 132 mil m², altura máxima de aproximadamente 6 m, contemplando um volume de 3 mil m³ e inclinação do talude de 1,5H:1V.

Para o desenvolvimento do *Stack break* foi realizada a setorização da pilha em 4 setores considerando a altura da PDE e análises de rupturas para cada um desses setores, contemplando as interferências existentes na área. Assim, os 4 setores foram: seção pelo talvegue, seção pelo acesso operacional e estrutura civil, seção pela cava e seção em direção ao transportador de correias, conforme Figura 1. Apesar da pilha ser confinada, existem estruturas próximas que podem ser atingidas pela estabilização de outros setores.

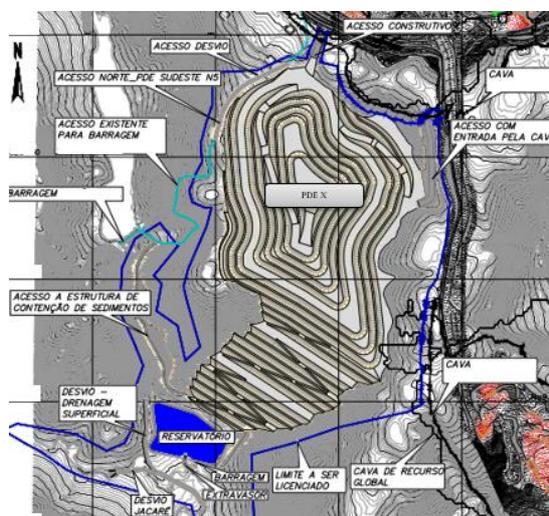


Figura 1. Representação esquemática da PDE estudada destacando as interferências consideradas nas análises.

Posteriormente, foram realizadas análises de estabilidade objetivando determinar os fatores de segurança (FS) para os taludes da PDE, seguindo as recomendações da NBR 13029/2017. Para tais estudos, foram elencadas as premissas: nas análises de estabilidade considerou-se o maciço de estéril como isotrópico e homogêneo e seção passando pelo fundo do vale; existência de possíveis materiais não consolidados, ou seja, solos moles, solos orgânicos, solos aluvionares e solos coluvionares, todos caracterizados por apresentar alta compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento; pesquisa por potenciais rupturas do tipo circular no sistema fundação-estéril, ou no estéril ou na fundação. Destaca-se que a fundação foi inferida com base em mapeamento geológico-geotécnico de superfície realizado e em informações de estruturas similares na região.

Os estudos de estabilidade foram realizados considerando o método do equilíbrio-limite (Bishop Simplificado) com a utilização do software Slide versão 6.0 (Rocscience). Os parâmetros geotécnicos adotados para as análises de estabilidade foram estimados baseados nas informações de estruturas similares na região, sendo esses majorados dada a baixa quantidade de dados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análises de Estabilidade

As Figura 2 a 5 apresentam os resultados das análises de estabilidade para os quatro setores avaliados, sendo esses resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados das Análises de Estabilidade.

Seção	FS mínimo (NBR 13.029/2017)	FS obtido
Setor 1	1,50	1,51
Setor 2	1,50	1,60
Setor 3	1,50	1,50
Setor 4	1,50	1,50

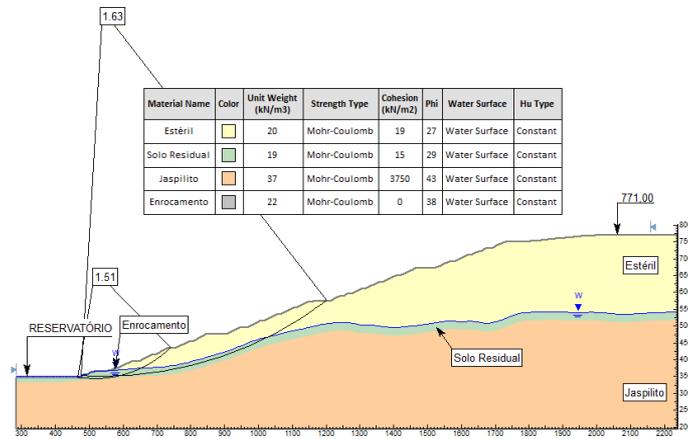


Figura 2. Resultados da análise de estabilidade para o Setor 1.

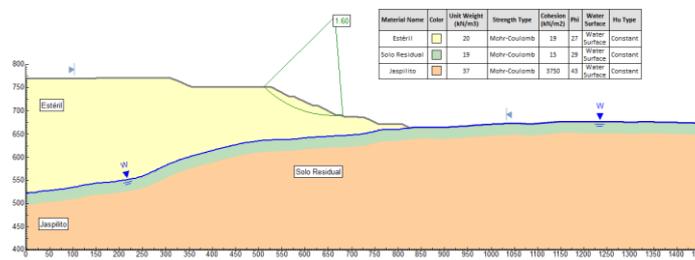


Figura 3. Resultados da análise de estabilidade para o Setor 2.

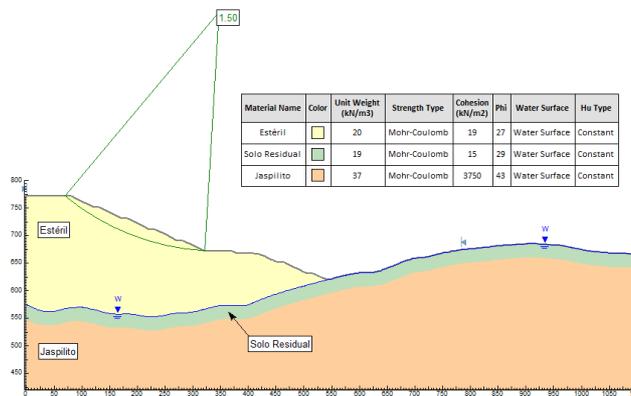


Figura 4. Resultados da análise de estabilidade para o Setor 3.

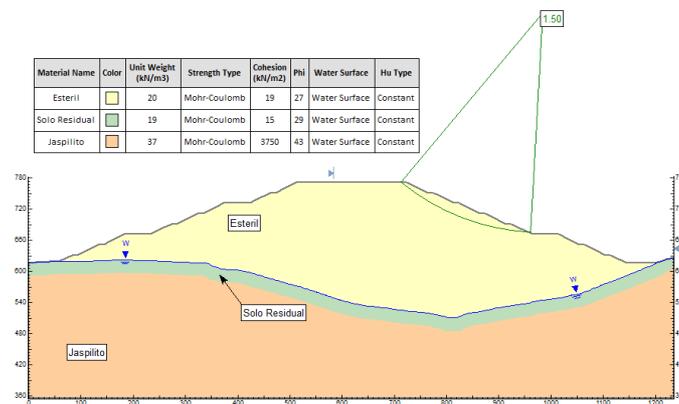


Figura 5. Resultados da análise de estabilidade para o Setor 4.

Após o processo de setorização com a definição das regiões críticas por meio das superfícies de ruptura foram obtidos os dados contidos na Tabela 2.

Tabela 2. Dados geométricos das superfícies de ruptura.

Seção	Altura (H) (m)	Volume Mobilizado (V) (m ³)	Largura (m)	Área (m ²)
Setor 1	225,37	25.415.468,91	711,02	35.745,08
Setor 2	62,92	892.114,69	340,12	2.622,94
Setor 3	99,70	2.285.114,37	503,30	4.540,26
Setor 4	98,02	2.204.803,07	497,20	4.434,44

3.2 Aplicação do método de Corominas (1996)

Dentre os métodos de estudo de propagação de massa para pilhas de estéril a maior parte é compreendida por análise empíricas ou análise dinâmicas. Entende-se que o estudo de Corominas é suficiente para análise de um projeto em seu estado conceitual, conforme sugerido no procedimento operacional. Assim, foram utilizadas as Equações 1 a 4, que relaciona a queda vertical (H) e a projeção horizontal da distância (L), cujos resultados são apresentados na Tabela 3.

$$\text{Queda de Blocos: } \log\left(\frac{H}{L}\right) = -0,109 \times \log(V) - 0,210 \quad (1)$$

$$\text{Rupturas translacionais: } \log\left(\frac{H}{L}\right) = -0,068 \times \log(V) - 0,159 \quad (2)$$

$$\text{Deslizamento de terra: } \log\left(\frac{H}{L}\right) = -0,070 \times \log(V) - 0,214 \quad (3)$$

$$\text{Escorregamento/Fluxo de detritos } \log\left(\frac{H}{L}\right) = -0,105 \times \log(V) - 0,012 \quad (4)$$

Tabela 3. Dados geométricos das superfícies de ruptura.

Seção	Ruptura	Alcance da massa rompida corrigida L (m)
Setor 1	Rupturas Translacionais	1.036,20
	Escorregamento de terra	1.216,89
	Fluxo de Detritos	1.388,13
Setor 2	Rupturas Translacionais	230,37
	Escorregamento de terra	268,73
Setor 3	Rupturas Translacionais	389,14
	Escorregamento de terra	454,80
Setor 4	Rupturas Translacionais	381,65
	Escorregamento de terra	446,02

3.2 Aplicação do método de Hunter & Fell (2003)

Além da metodologia de Corominas (1996), o método de Hunter & Fell (2003) também foi considerado na avaliação. Observa-se que é notado uma diferença entre o alcance calculado e o observado. Essa diferença se deve a diversos fatores, tais como: o tipo do material, o nível de saturação, a inclinação, a rugosidade e a presença de vegetação do terreno à jusante, dentre outros. A partir da avaliação da proposta, nota-se grande dispersão de dados, sendo verificada uma faixa de variação entre 0,4 L e 1,2 L entre os alcances calculados e observados.

Assim, foi estabelecida a premissa, a correção do alcance calculado, adaptado para pilhas de estéril, sendo adotado um fator de correção do alcance entre 0,4 e 1,2 em função do tipo de pilha e do terreno à jusante. Para tal, propõe-se a correção do alcance pela Equação 5, onde L' corresponde ao alcance corrigido, L o alcance em si e FC é o fator de correção em função da inclinação do terreno e tipo de estrutura.

$$L' = L \times FC \quad (5)$$

Conforme dados estabelecidos em projeto a localização da PDE (Figura 1) está localizada com terreno a jusante com inclinação entre 10° e -10°. Dessa forma, adotou-se o fator de correção do alcance de 0,5 para

metodologia proposta do por Hunter & Fell (2003), sendo os resultados obtidos, considerando o alcance corrigido, na Tabela 4

Tabela 4. Resultados obtidos nas Análise de Propagação Hunter & Fell (2003).

Seção	Ruptura	Alcance da massa rompida corrigida L (m)
Setor 1	Fluxo de Detritos	832,88
Setor 2	Escorregamento de terra	161,24
Setor 3	Escorregamento de terra	272,88
Setor 4	Escorregamento de terra	267,61

3.3 Análise dos Resultados

A Figura 6 apresenta os resultados das rupturas hipotéticas. A partir dos resultados obtidos por ambos os métodos, o método de Corominas (1996) se mostrou conservador. No Setor 1, a propagação da macha foi de aproximadamente 1.390 m e desta forma cobrindo totalmente o dique, se estendendo até o talvegue a jusante, visto que o mesmo é bem encaixado e a declividade é bem definida o que facilita o escoamento do material rompido. Essa ruptura geraria impacto a uma interferência, pois poderá causar interrupção do fluxo natural do curso de água, podendo formar um represamento. Para essa ruptura hipotética deverá ser realizado um estudo complementar quando a massa mobilizada sobre o barramento, podendo gerar uma mancha maior que a calculada devido o arraste dos sedimentos, água e a própria estrutura do barramento.

No setor 2 a mancha de ruptura se propaga por aproximadamente 270,00 m, majoritariamente na área da pilha e podendo atingir o acesso operacional da barragem a montante e o acesso operacional da própria estrutura de contenção de sedimentos (diqe).

Já as manchas para os Setores 3 e 4, estão voltadas em direção: a taludes de encostas naturais, a drenagem superficial da pilha (canais periféricos) e ao acesso construtivo da pilha, porém em ambos os casos a massa rompida fica em estado confinado e não há expectativa da propagação da massa.

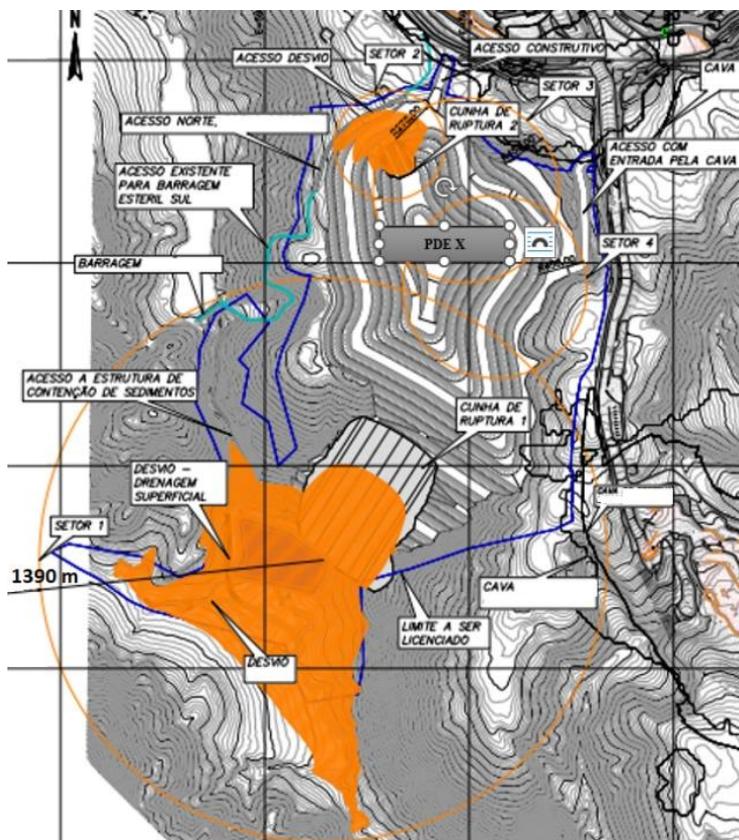


Figura 6. Representação esquemática da PDE com os setores analisados e manchas hipotéticas (laranja).

Diante dessa condição específica não há expectativa de propagação da possível massa rompida, tendo como ponto de atenção o impacto a estruturas de drenagens superficiais, como o canal periférico. Recomenda-se que: a classificação, o uso e ocupação, bem como a matriz de gestão de risco deverão ser avaliados em concordância com os estudos de impacto ambiental da estrutura, subdiados pelo estudo de ruptura desenvolvido.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos no presente artigo mostram os deslocamentos das massas mobilizadas na configuração final, justificando o uso de metodologias numéricas para comprovação dos comportamentos observados. Ambos os métodos aqui apresentados consideraram um critério de perda de resistência dos materiais em zonas específicas da seção de modo a gerar superfícies preferenciais de cisalhamento que permitiram avaliar os cenários de ruptura mobilizando o estéril. Apesar da ausência de normativa no Brasil para este tipo de estudo, os métodos aqui apresentados são adequados para projetos a nível conceitual, merecendo devida atenção para que possam ser aprimorados levando em consideração as características dos materiais, bem como as variáveis de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Corominas, J. (1996) *The angle of reach as a mobility index for small and large landslides*. Canadian Geotechnical Journal, 33, pp.260–271.
- Hunter, G., Fell, R. (2003). *Travel distance angle for “rapid” landslides in constructed and natural soil slopes*. Canadian Geotechnical Journal, 40(6), pp.1123–1141.
- NBR 13029/2017. *Mineração - Elaboração e apresentação de projetos de disposição de estéril em pilhas*.
- Riselo, B. C. T., Passini, L. B., Kormann, A. C. M. (2023). Stability analysis of a slope and runout analysis movement of the mobilized-mass volume. Soil and Rocks – A International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Trocone, A., Pugliese, L., Conte, E. (2020). Run-Out Simulation of a Landslide Triggered by an Increase in the Groundwater Level Using the Material Point Method. DOI: 10.3390/w12102817