

Análise de Estabilidade com Abordagem Probabilística em Taludes de Cavas de Mineração a Céu Aberto

Marcela Rego Moreira

Geoestável Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, marcela.moreira@geoestavel.com.br

Renata Botelho Lourenço

Geoestável Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, renata.lourenco@geoestavel.com.br

Leonardo Carvalho Ventura

Geoestável Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, leonardo.ventura@geoestavel.com.br

César de Jesus Ferreira Santos

Geoestável Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, cesar.santos@geoestavel.com.br

RESUMO: Neste artigo é apresentada e aplicada uma metodologia de desenvolvimento de análises probabilísticas de estabilidade de taludes, a fim de avaliar o risco geotécnico aplicado a cavas de mineração. Foi recomendada a metodologia FOSM (*first order, second moment*) e utilizado o software *Slide*[®], versão 6.0 da *Rocscience*, para a análise de rupturas complexas, ou seja, formada pela junção de dois ou mais mecanismos de ruptura (em cunha, planar, tombamento ou circular), mobilizando diversos planos de anisotropia e/ou mesmo a resistência intrínseca da matriz rochosa. Já para as rupturas em cunha e planares, foi utilizado o software *Swedge*[®], versão 6.0 da *Rocscience*. A metodologia proposta é aplicada a um estudo de caso de dimensionamento de taludes de cava a céu aberto. A mesma foi considerada aplicável e apresenta resultados interessantes do ponto de vista de gestão do risco geotécnico. Diferentemente da abordagem determinística, observa-se que a introdução do conceito de probabilidade de ocorrência e probabilidade de falha apontou as áreas prioritárias de monitoramento das condições de segurança dos taludes.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Análise Probabilística, Probabilidade de Falha, Cava a Céu Aberto.

1 INTRODUÇÃO

Na Engenharia Civil comumente são utilizados métodos determinísticos a fim de se quantificar a resistência de um determinado objeto de estudo. Os métodos determinísticos são definidos como aqueles que tratam das incertezas dos seus dados utilizando parâmetros médios.

Especificamente na Geotecnia, considerar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo como constantes em análises de estabilidade simplifica a dispersão e variabilidade natural dessas variáveis, o que pode ser compensado pela aplicação de elevados fatores de segurança. Esses parâmetros são comumente

definidos pela experiência dos profissionais envolvidos no projeto, muitas vezes a partir de dados escassos de resultados de ensaios e observações de campo.

Entretanto, na verdade, o desejável seria a determinação via ensaios de campo e/ou de laboratório. O resultado dessa prática proporciona a estimativa de valores da resistência do material, normalmente superestimada, e, em alguns casos, pode ser subestimada se comparada às condições reais de campo. Por isso, a utilização de métodos probabilísticos compreende uma das soluções para trabalhar as incertezas intrínsecas aos parâmetros geotécnicos.

No entanto, há que se avançar na interpretação dos resultados e aplicação em casos práticos, já que não se obtém o convencional fator de segurança único, mas sim uma probabilidade de falha.

2 OBJETIVO

Apresentar e aplicar uma metodologia de desenvolvimento de análises probabilísticas de estabilidade de taludes aplicadas à cavas de mineração.

3 METODOLOGIA

A fim de realizar a avaliação da estabilidade de taludes de uma cava de mineração com maior confiabilidade e tratamento das incertezas, é necessário desenvolver metodologias para aplicação da abordagem probabilística. Esta metodologia deve ser sistemática e objetiva, tanto em termos de desenvolvimento das etapas de projeto e execução de uma série de análises de estabilidade, quanto em relação à interpretação dos resultados e pode ser dividida em quatro etapas:

1. Definição do critério de aceitação de projeto;
2. Definição dos parâmetros geotécnicos;
3. Análises de estabilidade determinística de taludes; e
4. Análises de estabilidade probabilística de taludes.

As etapas citadas serão detalhadas a seguir.

3.1 Definição do critério de aceitação de projeto

A definição do critério de aceitação de projeto deve ser realizada de acordo com o risco da estrutura analisada no projeto geotécnico. Como se trata de um projeto que envolve análises de estabilidade probabilísticas, o critério deve abranger um fator de segurança mínimo ($FoS_{(MIN)}$) e uma probabilidade de falha máxima ($PoF_{(MAX)}$).

Por isso, é recomendada a definição de critérios diferentes para rupturas de taludes globais/interrampa e de bancada. Rupturas de taludes globais/interrampa, neste caso, são definidas como aquelas que envolvem a instabilização de mais de uma bancada. Entende-se que essas possuem maiores consequências que as rupturas de bancada, portanto, neste caso, é coerente a adoção de critérios mais rígidos.

Segundo Read & Stacey (2009), os resultados das análises de estabilidade desenvolvidas para os taludes em termos de abordagem determinística (método FoS) e probabilística (método PoF) devem atender aos valores típicos dos critérios de aceitação de projeto apresentados na Tabela 1. Esses valores, entretanto, podem ser adaptados de acordo com as características da cava e responsabilidade que a mineradora pretende assumir.

Tabela 1. Critérios de aceitação de projeto

Escala do Talude	Consequência de Ruptura	Critérios de Aceitação		
		$FoS_{(MIN)}$ (Estático)	$FoS_{(MIN)}$ (Dinâmico)	$PoF_{(MAX)}$
Bancada	Baixa - Alta	1,1	NA	25-50%
	Baixa	1,15 – 1,2	1,0	25%
Interrampa	Média	1,2	1,0	20%
	Alta	1,2 – 1,3	1,1	10%
	Baixa	1,2 – 1,3	1,0	15-20%
Global	Média	1,3	1,05	5-10%
	Alta	1,3 – 1,5	1,1	≤5%

Fonte: Modificado de Read & Stacey, 2009

3.2 Definição dos parâmetros geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos devem ser definidos preferencialmente com base nos resultados de ensaios de laboratório. No caso de solos, inicialmente, é importante realizar ensaios de caracterização, como granulometria completa, densidade dos grãos e limites de consistência; para definição do peso específico e composição dos diferentes materiais. Em seguida, pode-se aplicar o ensaio de cisalhamento direto e compressão triaxial a fim de determinar os parâmetros de resistência efetivos de Mohr-Coulomb do solo, com condições de saturação e velocidade de ensaio compatível com a situação de campo.

Outra ferramenta importante para a determinação dos parâmetros geotécnicos são as retroanálises, caso tenha ocorrido algum colapso na cava anteriormente ao projeto. Para isso, podem ser utilizadas informações de estudos anteriores realizados para a cava e a experiência dos profissionais envolvidos no projeto. O software *RocData*[®], da *Rocscience*, também constitui um instrumento para conversão de parâmetros geotécnicos segundo o critério de Mohr-Coulomb para os parâmetros de Barton-Bandis.

Para o desenvolvimento das análises de estabilidade determinísticas, inicialmente podem ser utilizados parâmetros de resistência efetivos segundo o critério de Mohr-Coulomb para rupturas circulares, admitindo-se que este tipo de ruptura ocorre em maciços rochosos bastante alterados e solos. Se houver potencialidade de ocorrência de ruptura circular em maciços pouco alterados, podem ser adotados diferentes parâmetros de Mohr-Coulomb nas direções paralela e oblíqua às descontinuidades (anisotropia de resistência). Já no caso de avaliação de rupturas em cunha e planares em maciços rochosos menos alterados, a utilização do critério de Barton-Bandis é mais adequada.

Caso seja identificada a possibilidade de ocorrência de efeitos do sismo induzido pelas atividades de desmonte realizadas durante a lavra e da variação da pressão de água existente no interior das descontinuidades abertas mapeadas em campo, por exemplo, devem ser realizados estudos paramétricos mais

aprofundados. Neste caso, as análises de estabilidade podem ser conduzidas separadamente, com parâmetros geotécnicos em termos de tensões totais e consideração do coeficiente R_u .

Para as análises probabilísticas, a escolha da distribuição deve ser realizada preferencialmente a partir de um banco de dados com resultados de ensaios para os parâmetros geotécnicos das litologias presentes na cava. A partir disso, pode-se calcular a média e desvio padrão de cada amostra. Além disso, para auxiliar a escolha da distribuição, podem ser aplicados testes de aderência como o de Kolmogorov-Smirnov.

3.3 Análises de estabilidade determinística de taludes

As análises determinísticas devem ser realizadas considerando os valores médios para os parâmetros de resistência e geometria dos taludes em cada setor. Estas análises permitirão a identificação da probabilidade de ocorrerem fatores de segurança abaixo da referência adotada ($FS=1,0$), seja por mecanismos de ruptura em cunha, planar ou circular. Devem admitidos os seguintes potenciais condicionantes de mecanismos de ruptura: geometrias dos taludes, resistência dos materiais, condição de nível de água subterrâneo e presença de sismo: natural ou induzido por atividades de desmonte de rochas.

Nas análises de estabilidade de verificação das potenciais rupturas em cunha e planar, recomenda-se a utilização de softwares similares ao *Swedge*[®], versão 6.0 da *Rocscience*. O *Swedge*[®] 6.0 é considerado interessante devido a sua integração com o *Dips*[®] 6.0, ou seja, um arquivo completo do *Dips*[®] decorrente das análises cinemáticas pode ser importado diretamente para a análise de estabilidade em estudo. Deve ser verificada toda potencial combinação (análise combinatória) de cada uma das medidas de direção e mergulho das descontinuidades mapeadas a partir das atitudes médias dos setores geotécnicos (*dip* e *dip direction*).

A partir da análise combinatória determinística das diferentes descontinuidades

para cada setor, serão obtidas as quantidades de cunhas ou planos possíveis geometricamente (CPos ou PPos, respectivamente) e de cunhas ou rupturas planares prováveis (CPro ou PPro, respectivamente). A probabilidade de FS ser menor que 1,0, denominada como probabilidade de ocorrência (PO), é calculada como a razão de cunhas prováveis (CPro) pelas cunhas possíveis (CPos) ou pela razão de PPro pelas PPos, no caso de rupturas planares.

Já nas análises de potenciais rupturas circulares deve ser considerado o método de equilíbrio limite adequado e utilizado softwares similares ao *Slide*[®], versão 6.0, da *Rocscience*. Devem ser analisadas especificamente as seções especiais representativas dos setores geotécnicos. Como se trata de uma análise de um perfil real da cava, ou seja, diferentemente do *Swedge*[®] 6.0, em que são analisados taludes homogêneos de geometria média, a seção analisada é complexa em termos de composição de litologias, a probabilidade de FS ser menor que 1,0 pode ser considerada como 100% para as análises não aceitáveis, segundo o critério de projeto.

Usualmente o mecanismo de ruptura por tombamento não precisa ser abordado nas análises de estabilidade de taludes da cava devido a sua ocorrência pontual e em baixa escala, se comparado aos demais mecanismos. Além disso, os operadores de lavra têm experiência em lidar com recorrentes quedas de blocos. Entretanto, caso seja um aspecto significativo da estabilidade da cava, é importante a utilização de softwares similares ao *RS2 (Phase2, 9.0)*, da *Rocscience*.

As análises de estabilidade de taludes devem ser realizadas em âmbito global/interrampa e em âmbito de bancada. De acordo com o critério de projeto, sempre que o $FS_{(MÍN)}$ for menor que o valor de referência $FoS_{(MÍN)}$ (aceitável), será conduzida também a respectiva análise probabilística, conforme metodologia a ser detalhada no item a seguir.

3.4 Análises de estabilidade probabilística de taludes

No estudo probabilístico dos potenciais mecanismos de ruptura deve ser avaliada a

influência da variabilidade da resistência das descontinuidades, do peso específico dos materiais e da geometria dos taludes (altura e inclinação), de acordo com as incertezas presentes no estudo.

Para potenciais rupturas em cunha, a análise probabilística deve ser conduzida apenas para a superfície mínima, resultante da combinação de descontinuidades apontada pelo *software* como a responsável pelo fator de segurança mínimo na análise determinística. Nesta análise, deve-se incluir a variabilidade dos parâmetros de resistência das descontinuidades, do peso específico e da geometria dos taludes. Com isso, será tomada a probabilidade do FS ser menor que 1,0 ($PoF_{[FS < 1,0]}$) como a razão de cunhas ou planos rompidos sobre as cunhas ou planos válidos apontados pelo *software*. A probabilidade de falha (PF) será determinada como o produto entre a PO e a $PoF_{[FS < 1,0]}$.

Já no estudo probabilístico das potenciais rupturas circulares deve ser avaliada a influência da variabilidade do fator de segurança de acordo com a variação da resistência dos materiais que compõem os taludes. Este estudo pode ser conduzido utilizando a metodologia FOSM. Inicialmente são identificados os materiais que ficam no interior da superfície potencial de ruptura para a qual foi obtido FS inferior a 1,0. Pelo método das diferenças divididas, deve-se, em seguida, identificar as variáveis que mais impactam a variação do FS.

Com base nesta informação, a análise de estabilidade probabilística da seção especial deve incluir a variabilidade das variáveis identificadas. Com isso, será tomada a probabilidade calculada pelo *software* de FS ser menor que 1,0 ($PoF_{[FS < 1,0]}$). A probabilidade de falha (PF) será determinada como o produto entre a PO (100%) e a $PoF_{[FS < 1,0]}$, ou seja, no caso de ruptura circular, a PF é igual à $PoF_{[FS < 1,0]}$.

4 ESTUDO DE CASO

A metodologia de desenvolvimento de análises de estabilidade probabilísticas apresentada no capítulo 3 foi diretamente aplicada no projeto de uma cava a céu aberto, para validação da geometria de cava final em Minas Gerais.

O modelo geológico geomecânico da mina é resultado de um mapeamento litoestrutural e geomecânico realizado na região. E entre às feições estruturais catalogadas, foram abordadas na análise geotécnica: acamamento sedimentar (S0)/foliação metamórfica (Sn), fraturas (Fr) e falhas (Fa). A partir da divisão das medidas das descontinuidades em grupos tendenciais e realização das análises cinemáticas, dividiu-se a área de mapeamento em três domínios estruturais e em 14 setores de análise, cada um deles representado por uma seção especial.

Os taludes da cava foram divididos em duas escalas: bancada e globais/interrampa, por isso foram adotadas dois critérios de aceitação de projeto, conforme Tabela 2. Os resultados das análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas para os mecanismos de ruptura complexa (formado pela conjunção de dois ou mais dos mecanismos de ruptura), em cunha e planar estão resumidos nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 2. Critérios de aceitação de projeto adotados para o Estudo de Caso

Escala do Talude	Consequências de Ruptura	Critérios de Aceitação	
		$FOS_{(MIN)}$	$PoF_{(MAX)}$
Bancada	Baixa - Alta	1,1	25%
Global/ Interrampa	Baixa - Alta	1,3	5%

Ressalta-se que, caso as análises de estabilidade de taludes fossem conduzidas apenas em termos determinísticos, a avaliação dos resultados promoveria a proposta de nova geometria para todos os setores geotécnicos, com exceção do setor 14. Entretanto, a abordagem probabilística permitiu que fosse detectada a baixa probabilidade de falha nos setores 02, 03, 04, 05 e 06, ou seja, houve uma redução de quase 50% de reformulação da geométrica dos setores da cava.

Tabela 3. Resumo dos resultados das análises de estabilidade (Índices de estabilidade) – Setor 01 ao Setor 07

Setor	Mecanismo de Ruptura	$FS_{(MIN)}$ (Determin.)		$FS_{(MIN)}$ (Probab.)		PF (%) = $PO * PoF_{[FS < 1,0]}$	
		Bancada	Global	Bancada	Global	Bancada	Global
01	Planar	0,67	0,94	0,67	0,94	24,15	1,14
	Cunha	0,68	0,94	0,68	0,94	66,67	12,75
02	Planar	0,85	0,00	0,85	0,00	1,16	0,73
	Cunha	0,95	0,00	0,95	0,00	9,67	2,04
03	Planar	1,02	1,30	1,02	-	0,00	-
	Cunha	1,01	1,30	1,01	-	0,00	-
04	Planar	1,16	1,49	-	-	-	-
	Cunha	0,98	-	0,98	-	2,10	-
05	Complexa	1,40	1,23	-	1,23	-	0,17
	Planar	1,02	1,50	1,02	-	0,00	-
	Cunha	0,95	-	0,95	-	8,31	-
06	Complexa	1,22	1,16	-	1,18	-	0,12
	Planar	1,04	1,74	1,04	-	0,00	-
07	Complexa	1,03	1,81	1,03	-	0,00	-
	Cunha	1,03	0,00	1,03	0,00	0,00	13,25

Tabela 4. Resumo dos resultados das análises de estabilidade (Índices de estabilidade) – Setor 08 ao Setor 14

Setor	Mecanismo de Ruptura	$FS_{(MIN)}$ (Determ.)		$FS_{(MIN)}$ (Probab.)		PF (%) = PO * PoF _[FS<1,0]	
		Bancada	Global	Bancada	Global	Bancada	Global
08	Complexa	0,72	1,19	0,76	1,21	96,72	4,18
	Planar	1,32	0,88	-	0,88	-	1,74
	Cunha	1,02	0,66	1,02	0,66	0,00	28,63
09	Planar	0,82	2,53	0,82	-	2,09	-
	Cunha	0,67	-	0,67	-	27,24	-
10	Complexa	1,69	0,89	-	0,90	-	86,26
	Planar	0,78	5,07	0,78	-	9,12	-
	Cunha	0,87	-	0,87	-	19,41	-
11	Planar	0,69	4,67	0,69	-	13,48	-
	Cunha	0,69	-	0,69	-	27,26	-
12	Complexa	2,52	1,03	-	1,02	-	45,59
	Planar	0,67	0,00	0,67	0,00	10,10	48,76
	Cunha	0,68	-	0,68	-	41,67	-
13	Complexa	1,33	1,08	-	1,11	-	27,40
	Planar	0,68	0,00	0,68	0,00	10,70	42,05
	Cunha	0,74	0,00	0,74	0,00	44,72	33,33
14	Complexa	1,53	1,93	-	-	-	-

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que a metodologia apresentada no presente trabalho, adotada no estudo de caso, foi considerada aplicável e apresenta resultados interessantes do ponto de vista de gestão do risco geotécnico. Diferentemente da abordagem determinística, observa-se que a introdução do conceito de probabilidade de ocorrência e probabilidade de falha da abordagem probabilística aponta as áreas prioritárias de monitoramento das condições de segurança dos taludes. Isso promove condições para a quantificação do risco geotécnico e otimização da geometria da cava, reduzindo custos.

As principais fontes de incerteza identificadas do estudo de caso foram a estimativa dos parâmetros de resistência adotados nas análises de estabilidade e a carência de informações das condições piezométricas locais. Assim, ressalta-se ser de fundamental importância que, com o avanço das atividades de lavra, devem ser realizadas atualizações do modelo geológico-geotécnico e revisões dos estudos de estabilidade dos taludes, a partir de um maior banco de dados.

Como sugestões para aprimoramento da metodologia, pode-se desenvolver um estudo mais detalhado a respeito do número de iterações na análise probabilística e número de

amostras na análise combinatória necessários para a convergência do fator de segurança e obtenção de certo nível de confiabilidade. Além disso, pode-se realizar um estudo para avaliar os coeficientes de covariação na análise FOSM, já que no presente trabalho foi adotado 10% tanto para o ângulo de atrito e 40% para a coesão.

REFERÊNCIAS

- BAECHER, G.B., and CHRISTIAN, J.T., *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, John Wiley and Sons, London and New York, 605p., 2003.
- COSTA, E.A. *Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.
- GUEDES, M.C.S. *Considerações sobre análise probabilística da estabilidade de taludes*. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1997.
- READ, J. & STACEY, P. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Design* (Editors: John Read and Peter Stacey). Cairo Publishing – Austrália, 88 – 263 pp;
- SILVA, E.M. *Análise de Estabilidade de Taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do Quadrilátero Ferrífero*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2006.
- WHITMAN, R. V. *Evaluating calculated risk in geotechnical engineering*. Journal of Geotechnical Engineering. New York: ASCS, v. 110, n.2, p144-188. Feb.1984. 17.,Terzaghi Lecture.