

Comparação entre Análises de Estabilidade Determinística e Probabilísticas, Apresentando uma Consequente Análise de Risco

Isabela Moreira Queiroz

Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental, Belo Horizonte, Brasil, belamq@yahoo.com.br

RESUMO: As análises de estabilidade de taludes são em sua grande maioria realizadas por métodos determinísticos e avaliadas por meio de um único fator de segurança. Embora se saiba que os parâmetros geotécnicos podem apresentar grande dispersão, nessas análises eles são considerados fixos e conhecidos. Os métodos probabilísticos, por sua vez, incorporam a variabilidade de parâmetros chave de entrada (variáveis aleatórias), resultando em uma faixa de valores de fatores de segurança, permitindo, assim, a determinação da probabilidade de ruptura, que é um parâmetro essencial no cálculo do risco (probabilidade multiplicada pela consequência do evento). Entre os métodos probabilísticos, existem três frequentemente utilizados no meio geotécnico: FOSM (Primeira Ordem e Segundo Momento), Pontos de Estimativa (Rosenblueth) e Monte Carlo. Neste trabalho é apresentada uma comparação entre os resultados provenientes de análises determinísticas e probabilísticas (método FOSM, Monte Carlo e Rosenblueth) aplicadas à um talude hipotético. Ao final foi realizada a avaliação do comportamento do talude e consequente análise de risco, que é utilizada para calcular o risco e analisar suas soluções de mitigação e de controle. Pode-se observar que os resultados obtidos pelos três métodos probabilísticos ficaram bastante próximos. Observa-se também que o cálculo do risco possibilita elencar as estruturas em graus de prioridade para a realização de medidas de mitigação. Por tanto, recomenda-se fazer uma boa avaliação do modelo geológico-geotécnico e incorporar incertezas na viabilidade, projeto, construção, operação e fechamento por meio de gestão de riscos.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de risco, Métodos probabilísticos, Estabilidade de taludes, Gestão de risco.

1 INTRODUÇÃO

O estudo para analisar a estabilidade do talude pode ser feito através de métodos determinísticos ou probabilísticos. Normalmente uma análise de estabilidade é realizada para determinar as condições de projeto de tal maneira que garantam a segurança mínima necessária.

A análise probabilística se diferencia da determinística, principalmente, por considerar a variabilidade dos parâmetros. A maioria dos dados de entrada em uma análise de estabilidade de taludes não é conhecida com precisão. A variabilidade se deve à dispersão dos resultados de ensaios ou à variabilidade natural no valor da grandeza que existe de um

ponto a outro no talude. Há, portanto, uma distribuição de valores para cada parâmetro, o que faz com que sejam considerados variáveis aleatórias. Dessa maneira, conclui-se que o próprio fator de segurança é uma variável aleatória, que depende de muitas variáveis de entrada e possui sua própria distribuição.

Existem três métodos probabilísticos comumente usados no meio geotécnico: FOSM (Primeira Ordem e Segundo Momento), Pontos de Estimativa (Rosenblueth) e Monte Carlo.

O método de Monte Carlo estabelece que as funções de distribuição de probabilidade das variáveis independentes sejam inicialmente conhecidas. Na falta destas, geralmente adota-se uma distribuição normal. Tem como vantagem a obtenção da distribuição do fator de segurança

(variável dependente). Como desvantagem o método demanda tempo, grande esforço computacional e programas específicos (Hammersley & Handscomb, 1964).

Já o método dito de Primeira Ordem Segundo Momento (FOSM) apresentado por Christian et al. (1992), baseia-se no truncamento da série de Taylor para a função variável dependente (fator de segurança). O valor médio da variável dependente é calculado a partir dos valores médios das variáveis independentes. O desvio padrão é calculado a partir das variâncias dos parâmetros de entrada e das derivadas da variável dependente em relação a cada variável independente. Uma vantagem deste método é a quantificação da influência de cada variável independente na variância do fator de segurança. Como desvantagem, não obtém uma distribuição de fator de segurança devendo-se adotar hipóteses sobre esta distribuição. Além disso, a probabilidade de ruptura máxima nem sempre está relacionada com a superfície de ruptura referente ao fator de segurança mínimo (Tobutt & Richards, 1979).

E por fim estaria o Método dos Pontos de Estimativa (Rosenblueth, 1975). O método de Rosenblueth dispensa o conhecimento das funções de distribuição das variáveis independentes, utilizando apenas seus valores calculados nos chamados pontos de estimativa (média mais desvio padrão e média menos desvio padrão). A variável dependente é calculada para estes pontos, obtendo-se uma amostra da qual se pode calcular sua média e desvio padrão. O método é de fácil aplicação. Deve-se, no entanto, assumir uma distribuição para o fator de segurança (geralmente normal) e supõe-se que a distribuição de cada variável independente seja simétrica.

Enquanto a abordagem determinística adota o fator de segurança como índice de estabilidade no problema de equilíbrio do talude, os métodos probabilísticos adotam como tal a probabilidade de ruptura, que é um dado de entrada na análise de risco.

O processo de análise de risco geralmente envolve as etapas de definição de escopo e seleção do método de análise, definição e

identificação das condições de perigo, estimativa da probabilidade de falha e consequência, estimativa do risco, documentação, verificação e atualização da análise. Os métodos de análise de risco podem ser de natureza qualitativa ou quantitativa. Os métodos de caráter qualitativo se apoiam em formas descritivas ou escalas de ordenação numérica para descrever as grandezas de probabilidade e consequência, enquanto que os quantitativos explicitam as incertezas, baseando-se, portanto, em valores numéricos da probabilidade e consequência (Hartford & Baecher, 2004 apud Melo, 2014).

Neste artigo compara-se a análise determinística e probabilística aplicada à estabilidade de um talude hipotético. E por fim apresenta-se uma análise de risco realizada pelo método quantitativo.

2 ESTUDO DE CASO

O talude analisado tem cerca de 40,0 m de altura e uma inclinação da ordem de 1V:2H.

As variáveis independentes (X_i) consideradas para as análises probabilísticas são a coesão (c'), o ângulo de atrito (ϕ') e o peso específico (γ).

Os parâmetros médios ($\bar{X}_i$) utilizados foram arbitrados de modo a obter fator de segurança determinístico médio da ordem de 1,5. Apesar de fictícios os valores adotados são bastante representativos. Os desvios padrões ($\sigma[X_i]$) foram arbitrados com base em coeficientes de variação típicos da literatura (Tabela 1). A Tabela 2 resume os valores adotados. A Figura 1 mostra o modelo geológico-geotécnico adotado, considerando o nível freático reduzido.

Tabela 1. Valores Típicos de Coeficiente de Variação Segundo Assis et al. (2001).

Parâmetro	Coeficiente de Variação (%)
Peso Específico	03 (02 a 08)
Coesão	40 (20 a 80)
Ângulo de Atrito Efetivo	10 (04 a 20)
Coesão Não Drenada	30 (20 a 50)

Tabela 2. Parâmetros Geotécnicos dos Materiais Utilizados.

Litologia	Coesão (kPa)			Ângulo de atrito (°)			Peso específico (kN/m ³)		
	Média	CV (%)	Desvio padrão	Média	CV (%)	Desvio padrão	Média	CV (%)	Desvio padrão
Silte arenoso	5,0	40	2,0	29,0	10	2,9	21,1	3	0,6
Areia pedregulhosa	5,0	40	2,0	34,0	10	3,4	29,0	3	0,9
Solo Residual	10,0	-	-	34,5	-	-	20,0	-	-
Saprolito	10,0	-	-	39,0	-	-	21,0	-	-



Figura 1. Modelo Geológico-Geotécnico Utilizado.

3 METODOLOGIA DE CÁLCULO

As análises de estabilidade foram realizadas com auxílio do programa Slide 6.0, desenvolvido pela empresa Rocscience. O fator de segurança foi calculado pelo método GLE/Morgenstern-Price.

A probabilidade de ruptura foi calculada utilizando-se os métodos probabilísticos de Monte Carlo, FOSM e Rosenblueth.

A aplicação desses três métodos probabilísticos requer a existência de uma formulação matemática que relaciona o indicador de falha (fator de segurança – variável dependente) com os dados de entrada (propriedades dos materiais, carregamento, nível d'água – variáveis independentes) (Assis et. al., 2013).

Considerando o fator de segurança como uma variável aleatória, pode-se calcular a probabilidade de ruptura como a probabilidade de FS ser igual ou inferior a 1, ou seja ($P [FS \leq 1]$).

A probabilidade de ruptura vem sendo cada vez mais utilizada como um critério de aceitação nos últimos 35 anos, embora ainda seja vista com diferentes graus de entusiasmo e ceticismo (Wesselloo & Read, 2009). Estes

autores apontam as seguintes vantagens no cálculo da probabilidade de ruptura:

- Permite a variação das forças resistentes e das forças mobilizadoras e ajudam a estabelecer o nível de confiança no projeto. A confiabilidade da estrutura é sua probabilidade de sucesso. Portanto, se a probabilidade de ruptura estimada de um talude é de 20%, a sua confiabilidade é de 80%;
- É um parâmetro essencial na quantificação do valor do risco (R), definido pela equação abaixo:

$$R = P_f \times (\text{consequência da ruptura}) \quad (1)$$

De acordo com Melo (2014), análise de risco baseia-se no uso da informação disponível para estimar o risco relativo a indivíduos ou populações, a propriedades ou ambientes, decorrentes de condições de perigo. Ela envolve a desagregação ou decomposição do sistema e fonte de risco nas suas partes fundamentais.

Tecnicamente, a análise de risco pode ser de qualitativa ou quantitativa. A análise qualitativa é utilizada de uma forma descritiva ou escalas de ordenação numérica para apresentar a magnitude de consequências potenciais e sua probabilidade de ocorrência. Já a análise quantitativa é baseada em valores numéricos das consequências potenciais e suas probabilidades, assumindo-se que tais valores sejam uma representação válida da magnitude real das consequências e da probabilidade do cenário estudado (Melo, 2014).

A probabilidade de ruptura é representada pela área sob a curva de distribuição de probabilidades, contida à esquerda de $FS = 1,0$, tal como ilustra a Figura 2. Nesta figura, estão

representadas as distribuições de probabilidade de dois casos A e B. O caso A apresenta um fator de segurança médio igual a 1,5 e um desvio padrão de 0,25 e o caso B possui um fator de segurança médio de 2,0 e desvio padrão de 0,85. De acordo com a Figura 2, pode-se observar que a probabilidade de ruptura do caso A é inferior ao do caso B, ou seja, o projeto A apresenta uma menor possibilidade de eventos indesejáveis (ruptura) (Maia, 2003).

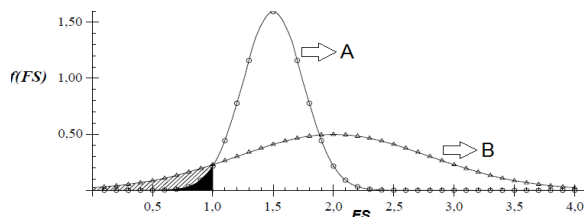


Figura 2. Distribuições Estatísticas com Diferentes Fatores de Segurança e Desvio Padrão (Maia, 2003).

A avaliação da distribuição de probabilidade do fator de segurança (variável dependente) e o cálculo da probabilidade de ruptura são realizados por meio da aplicação de métodos probabilísticos, os quais os mais importantes são os métodos Monte Carlo, FOSM, e Rosenblueth.

3.1 Método Monte Carlo

O método Monte Carlo foi utilizado pela primeira vez como uma ferramenta de pesquisa no desenvolvimento dos trabalhos da bomba atômica durante a Segunda Guerra Mundial (Hammersley & Handscomb, 1964 apud Maia, 2003). Trata-se de um procedimento iterativo que abrange quatro passos, descritos abaixo (Willie & Mah, 2004):

- Estimativa das distribuições de probabilidade para cada um dos parâmetros de entrada considerados como variáveis;
- Geração de valores aleatórios para cada parâmetro;
- Cálculo dos valores das forças atuantes e resistentes e verificação se as forças resistentes são maiores do que as atuantes;
- Repetição do processo N vezes ($N > 100$) e, em seguida, determinação da probabilidade de ruptura P_f de acordo com a seguinte equação:

$$P_f = \frac{N-M}{N} \quad (2)$$

Onde:

M é o número de vezes em que a força resistente excedeu as forças atuantes (ou seja, que o fator de segurança é maior que 1,0).

3.2 Método FOSM

O método FOSM (“First Order Second Moment”) foi inicialmente utilizado em projetos da indústria de aço (Kottogoda & Rosso, 1974 apud Maia, 2003). É um método que usa os primeiros termos de uma expansão da série de Taylor da função de desempenho (i.e. fator de segurança) para estimar o valor esperado (médio) e a variância da função de desempenho. É chamado de segundo momento porque a variância é uma forma de segundo momento, sendo o resultado de maior ordem estatística usado na análise (Baecher & Christian, 2003).

Assumindo múltiplas variáveis aleatórias, independentes entre si, as equações do método FOSM correspondem a:

$$E[F] = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (3)$$

$$V[F] = \sum_i^n \left(\frac{\partial F_i}{\partial x_i} \right)^2 \times V[X_i] \quad (4)$$

Onde:

$E[F]$ = valor médio esperado para F;

$V[F]$ = variância de F, igual ao quadrado do seu desvio padrão;

δF = Variação de F que ocorre quando se variam de um valor igual a δx_i cada um dos n parâmetros x_i ;

δX_i = Taxa de variação das variáveis envolvidas no estudo;

$V[X_i]$ = variância de cada um dos x_i .

Se o número de variáveis aleatórias é igual a n, este método requer a realização de n + 1 análises.

3.3 Método Rosenblueth

Neste método, a distribuição de uma variável aleatória X_i é concentrada em dois pontos particulares localizados por:

$$X_{i+} = \bar{X}_i + \sigma_i \quad (5)$$

$$X_{i-} = \bar{X}_i - \sigma_i \quad (6)$$

Onde:

$\bar{X}_i$ e σ_i são o valor médio e o desvio padrão da distribuição da variável X_i .

“O método dos pontos de estimativa, para o caso de n variáveis correlacionadas, necessita de 2^n valores estimados para cada combinação dos pontos particulares X_{i+} e X_{i-} . Após a realização da combinação dos pontos particulares, se inicia o procedimento probabilístico por meio de cálculos determinísticos, para este grupo de 2^n valores. Assim, para cada nova etapa do processo probabilístico, os cálculos determinísticos são alimentados por um grupo de novos valores (dados) de entrada a serem utilizados no próximo cálculo” (Maia, 2007).

A Figura 3 ilustra o procedimento de cálculo do método de Rosenblueth. Deve-se observar que este método assume que a distribuição do fator de segurança é normal e deve ser usado quando as variáveis aleatórias seguem a distribuição normal (Rocscience, 2013).

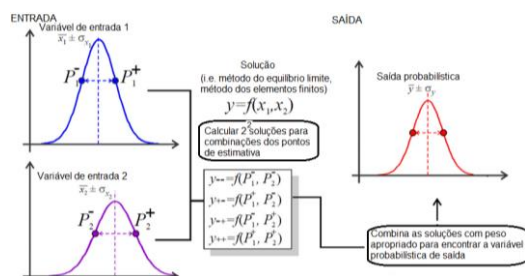


Figura 3. Esquema do Procedimento de Cálculo do Método de Rosenblueth (Rocscience, 2013).

4 RESULTADOS

4.1 FOSM

A primeira análise a ser realizada para aplicação do método FOSM utiliza os valores médios das variáveis aleatórias, resultando em um fator de

segurança médio determinístico. As demais análises aplicam uma taxa de acréscimo de 5% a 10% no valor médio de cada variável aleatória. A partir da aplicação da Equação 4, obtém-se a porcentagem de contribuição de cada variável aleatória na variância do fator de segurança. Para o cálculo da probabilidade de ruptura, adotou-se uma distribuição normal para o fator de segurança e utilizou-se a seguinte equação no programa Microsoft Excel:

DIST.NORM.N(x; média; desvio padrão; cumulativo) (7)

Onde o valor x corresponde ao valor mínimo adotado para o fator de segurança. Observa-se também que o valor lógico “cumulativo” deve ser definido como VERDADEIRO para considerar uma função de distribuição cumulativa.

Os resultados apresentados neste trabalho consideram o cálculo da probabilidade de ruptura, ou seja, $P_f [FS \leq 1,0]$. A seguir são apresentados os resultados obtidos pela aplicação do método FOSM.

A Figura 4 mostra a superfície crítica de ruptura e o fator de segurança mínimo obtido para o talude e a Figura 5 ilustra os resultados da aplicação do método FOSM. Na Figura 5 observa-se que a variável aleatória que mais contribuiu na variação do fator de segurança foi o ângulo de atrito do silte arenoso (71,8%). A coesão do silte arenoso contribuiu com 28,1% e o peso específico com apenas 0,1%.

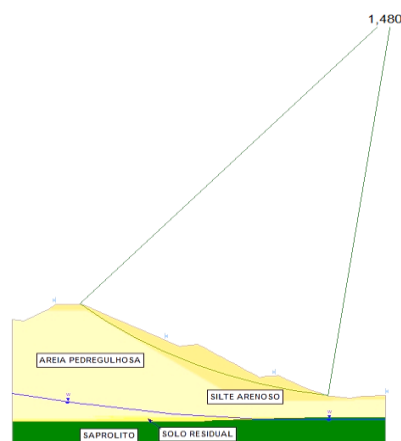


Figura 4. $FS_{médio} = 1,48$ (Determinístico).

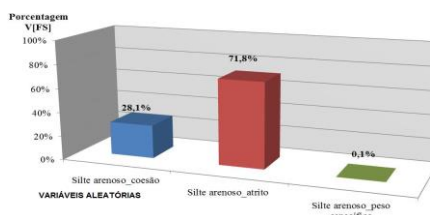


Figura 5. Porcentagem de Influência das Variáveis Aleatórias na Variação do Fator de Segurança do Talude.

A Tabela 3 apresenta o valor da probabilidade de ruptura obtido pela aplicação do método FOSM.

Tabela 3 - Resumo dos Resultados das Análises Aplicando o Método FOSM.

F _S médio	σ [FS]	P _f [FS ≤ 1,0]	Distribuição Estatística
1,48	0,15	7x10 ⁻⁴	Normal

Onde: σ [FS] = desvio padrão do fator de segurança; P_f [FS ≤ 1,0] = probabilidade de ruptura.

4.2 Monte Carlo

O programa Slide 6.0 possibilita a realização de análises probabilísticas com a utilização do método Monte Carlo, onde o usuário pode optar por utilizar a opção “Global Minimum” ou “Overall Slope”.

Para as análises apresentadas neste trabalho, optou-se pela opção “Global Minimum”, onde a análise probabilística é realizada na superfície de escorregamento que apresenta o fator de segurança mínimo global, calculado por uma análise de estabilidade determinística.

O fator de segurança é então calculado N vezes (onde N é o número de iterações) para essa superfície de ruptura, usando um diferente conjunto de valores (dados de entrada), gerados aleatoriamente para cada análise. A probabilidade de ruptura é o número de análises que resultaram em um fator de segurança menor que 1,0, dividido pelo número total de iterações. A opção de análise “Global Minimum” assume que a probabilidade de ruptura calculada para a superfície crítica com fator de segurança mínimo é representativa da probabilidade de ruptura para todo o talude (Rocscience, 2013).

O número de iterações realizadas para atingir a convergência pelo Método Monte Carlo depende do nível de confiança (α) admitido para o caso em estudo e pode ser estimado de

acordo com a seguinte equação:

$$N = \left(\frac{Z_{\alpha/2}^2}{4\alpha^2} \right) n \quad (8)$$

Onde:

N = Número de Tentativas;

Z = Parâmetro de Confiabilidade;

α = Tolerância;

n = Número de variáveis.

Desta forma, para 03 variáveis aleatórias e um nível de tolerância α igual a 10%, o número de iterações mínimas necessárias pelo método de Monte Carlo, estimado pela Equação 8, seria de aproximadamente 310.000.

Para os casos em que o número de iterações foi insuficiente para a convergência e/ou nenhum ou muito poucos valores de fatores de segurança, calculados durante a simulação pelo Método Monte Carlo, foram inferiores a 1,0, a área abaixo do histograma da distribuição do fator de segurança foi calculada pela Equação 7.

A Tabela 4 mostra o resultado obtido pelo Método Monte Carlo e a Figura 6 mostra o histograma do fator de segurança resultante das iterações realizadas no programa Slide 6.0.

Tabela 4. Resumo dos Resultados das Análises Aplicando o Método Monte Carlo.

F _S médio	σ [FS]	P _f [FS ≤ 1,0]	Distribuição Estatística
1,48	0,15	8x10 ⁻⁴	Normal

Onde: σ [FS] = desvio padrão do fator de segurança; P_f [FS ≤ 1,0] = probabilidade de ruptura.

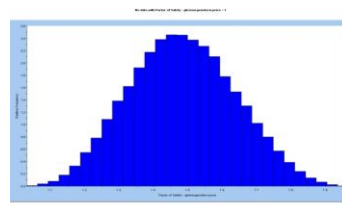


Figura 6. Histograma do Fator de Segurança.

4.3 Rosenblueth

Para a aplicação do método de Rosenblueth, foram consideradas as três variáveis aleatórias utilizadas nas análises anteriores, resultando em 8 combinações e nos valores de FS

apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Método de Rosenblueth - Combinações Realizadas.

Nº Cál cul o	Pontos Particulares			Valores			FS
	c' silte	ψ lte	γ _{si} lte	c' silte (kPa)	φ _{silte} (°)	γ _{silte} (kN/ m³)	
1	+	+	+	7,0	31,9	21,7	1,638
2	-	+	+	3,0	31,9	21,7	1,550
3	+	-	+	7,0	26,1	21,7	1,398
4	-	-	+	3,0	26,1	21,7	1,247
5	+	+	-	7,0	31,9	20,5	1,635
6	-	+	-	3,0	31,9	20,5	1,558
7	+	-	-	7,0	26,1	20,5	1,412
8	-	-	-	3,0	26,1	20,5	1,254

A Tabela 6 apresenta o resultado obtido pela aplicação do método de Rosenblueth.

Tabela 6. Resumo dos Resultados das Análises Aplicando o Método Rosenblueth.

FS _{médio}	σ [FS]	Pf [FS ≤ 1,0]	Distribuição Estatística
1,46	0,16	2x10 ⁻³	Normal

Onde: σ [FS] = desvio padrão do fator de segurança; P_f [FS ≤ 1,0] = probabilidade de ruptura.

4.4 Resumo dos Resultados

A Tabela 7 mostra uma comparação entre os resultados dos diferentes métodos probabilísticos analisados. Observa-se que, de maneira geral, os valores de probabilidade de ruptura obtidos pelos três métodos probabilísticos, ficaram bastante próximos.

Os valores obtidos pelos métodos FOSM e Monte Carlo, por exemplo, tem a mesma ordem de grandeza. Considerando o método de Rosenblueth, a ordem de grandeza dos valores é superior ao método FOSM e ao método Monte Carlo.

Tabela 7. Resumo dos Resultados Obtidos pelos Métodos Probabilísticos.

Método	E[FS]	σ [FS]	Pf [FS ≤ 1,0]	Função de Distribuição
FOSM	1,48	0,15	7x10 ⁻⁴	Normal
Monte Carlo	1,48	0,15	8x10 ⁻⁴	Normal
Rosenblueth	1,46	0,16	2x10 ⁻³	Normal

5 CONCLUSÕES

Deve-se ressaltar que uma grande vantagem da análise probabilística é reduzir o nível de conservadorismo, já que se pode considerar a variabilidade das propriedades geotécnicas dos materiais e não apenas um único valor.

Foi analisado um talude no qual predominava o efeito do ângulo de atrito do silte arenoso. De maneira geral podem ser ressaltados os seguintes pontos.

A importância de determinar com precisão o desvio padrão de cada variável envolvida no problema. Pequenos erros no coeficiente de variação de uma variável podem levar a erros significativos na probabilidade de ruptura em um talude que dependa fortemente desta variável.

A princípio, o peso específico não pode ser relevado. Este parâmetro afeta tanto os esforços resistivos, quanto os solicitantes. Desta forma pode afetar positivamente ou negativamente o fator de segurança.

Ressalta-se a importância da determinação rigorosa da superfície de ruptura, uma vez que todas as demais variáveis são calculadas em torno desta superfície.

Iniciar as análises pelo método FOSM, pois assim, obtêm-se as variáveis aleatórias a serem utilizadas nos outros dois métodos, sendo elas as variáveis que mais contribuíram na variação do fator de segurança.

Considerando todos os casos analisados, o que apresenta o maior valor de probabilidade de ruptura corresponde ao método de Rosenblueth (P_f = 2 x 10⁻³).

Dessa maneira, tendo avaliado a probabilidade de falha, seria possível realizar o cálculo do risco. Mas para ser possível estabelecer o risco, não basta apenas a identificação e quantificação da falha, uma vez que por risco se entende a combinação da probabilidade de falha com suas consequências. No caso estudado, para se chegar à uma análise de risco do talude, ainda se faz necessário uma análise destas consequências. Por exemplo, quais seriam os danos causados com a ruptura do talude? Caso ocorresse uma ruptura, poderiam ocorrer, destruição de casas, mortes

etc., para assim realizar a apreciação do risco em relação ao critério de aceitabilidade e tolerabilidade, que pode ser a nível individual ou societal (Pinto, 2008).

A aceitabilidade do risco a nível individual da ruptura é da ordem de 10^{-6} (Reino Unido; Morris et al.) a 10^{-6} a 10^{-8} (Austrália; ANCOLD, 1994) por pessoa e por ano. O risco individual, geralmente associado à probabilidade de perda de uma vida humana é uma forma sugestiva de representar o risco, já que permite a sua comparação imediata com diferentes tipos de acidente (Perini, 2009).

A aceitabilidade dos riscos societal é calculada por curvas FN, estabelecidas em termos do número de vítimas, N, e a respectiva probabilidade anual de ruptura (ou frequência, F, acumulada, por talude e por ano), com um valor esperado de vítimas igual ou superior a N. Os critérios de aceitabilidade e tolerabilidade representam os limites máximos admissíveis para o risco e estão representadas no gráfico seguinte, onde a probabilidade anual de ruptura está grafada no eixo das ordenadas e a consequência, tanto em custo monetário quanto em perdas de vidas humanas, no das abscissas (Baecher & Christian, 2003).

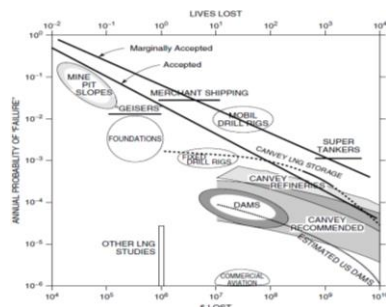


Figura 7. Níveis aceitáveis e marginalmente aceitáveis de risco (Whitman, 1984 apud Wyllie & Mah, 2004).

O estudo das consequências não foi realizado, portanto não se avaliou efetivamente o risco do talude. Portanto, o risco não foi apreciado em relação a nenhum critério de tolerabilidade necessário para decidir se o risco deve ou não ser mitigado.

REFERÊNCIAS

- Assis, A.P., Espósito, T.J., Gardoni, M.G. & Silva, P.D.E.A. (2001). Métodos Estatísticos Aplicados a Geotecnia. Publicação G.AP-002/01, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 177 p.
- Baecher, G. B. & Christian, J. T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley and Sons, England.
- Hammersley, J.M. & Handscomb, D.C. (1964). Monte Carlo Methods John Wiley & Sons, New York, USA.
- Hartford, D. N. D.; Baecher G. B. Risk and uncertainty in dam safety. London: Thomas Telford Publishing, 2004. 391 p.
- Kottegoda, N.T. & Rosso, R. (1997). Statistics, Probability, and Reliability for Civil and Environmental Engineers. McGraw-Hill Publishing Company, New York, USA, 735 p.
- Maia, J.A.C. (2003). Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rocha. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-099/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 192 p.
- Maia, J.A.C. (2007). Modelagem Probabilística da Zona Plástica de Obras Subterrâneas em Meios Rochosos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-040/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.
- Melo, A. V. (2014). Análise de Risco Aplicadas a Barragens de Terra e Enrocamento: Estudo de caso de Barragens da CEMIG GT. Dissertação de Mestrado, Publicação, Engenharia de Transporte e Geotecnia – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- Perini, D. S. (2009). Estudo dos Processos Envolvidos na Análise de Riscos de Barragens de Terra. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-180/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.
- Pinto, A. V. (2008). Gestão de Risco e Segurança de Barragem. Apresentação no 3º Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados –G.DM-180/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.
- Rocscience (2013a). Analysis of Slope Stability Course.
- Rocscience (2013b). Tutoriais do Slide 6.0.
- Rosenblueth, E. (1975). Point Estimates for Probability Moments. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, USA, 72(10): 3812–3814.
- Tobutt D.C. & Richards E.A. (1979). The reability of earth slopes. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 3:323-354.
- Wessellou, J. & Read, J. Guidelines for Open Pit Slope Design. Editors: John Read & Peter Stacey. Acceptance Criteria, 221 – 236.
- Whitman, R.V. (1984) Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. J. Geotech Engng, ASCE, 110, 145-88.
- Wyllie, D.C. and Mah, C. W.: Rock Slope Engineering, Civil and Mining, 4th Edition, Taylor & Francis, London and New-York, 2004.