

Avaliação probabilística de obras de Contenção. Caso de estudo.

Liosber Medina García

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, liomedina83@gmail.com

Carlos A. Recarey Morfa

Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba, recarey@uclv.edu.cu

Márcio Muniz de Farias

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mmuniz94@gmail.com

Domingo E. Delgado Martínez

Universidad Latina de Costa Rica, San José, Costa Rica, domingodelgadamartinez@gmail.com

RESUMO: Este artigo apresenta uma análise probabilística de uma obra de contenção de taludes. A obra analisada é o talude nos arredores de um hotel de turismo de natureza, localizado na região de Topes de Collantes, no centro da ilha de Cuba. O talude norte apresentou sintomas de falha com baixas velocidades de deslocamentos e por isso foi projetada uma cortina de estacas com o objetivo de estabilizar o talude. Geralmente a avaliação da estabilidade de diversas estruturas é feita com o uso de conceitos determinísticos. O fator de segurança (FS) obtido geralmente deve ser suficiente para garantir a estabilidade da obra com certa margem de erro, mas é fato conhecido que este tipo de análise determinística não leva em consideração as incertezas devido à natureza heterogênea do solo e dos eventos naturais. Eventualmente é possível determinar a probabilidade de ocorrência do processo de ruptura e suas consequências ou danos. A probabilidade de ruptura é correlacionada com o valor médio do fator de segurança e seu desvio padrão (s). A metodologia probabilística adotada para analisar a estabilidade da obra é baseada no Método de Monte Carlo. O fator de segurança determinístico foi calculado com o método de Morgenstern-Price, fixando-se a linha freática na condição crítica coincidente com o nível do terreno. As condições geométricas do talude, o coeficiente de cargas sísmicas e as propriedades das estacas foram consideradas constantes, enquanto que foram consideradas distribuições normais para as demais variáveis de entrada, quasi sejam peso específico, coesão e ângulo de atrito do solo. O método de Monte Carlo fornece uma distribuição de resultados de FS, obtidos a partir das distribuições de probabilidade das variáveis de entrada. Para o processo de cálculo foi utilizado o código comercial SLOPE/W. Foram analisados três perfis do talude e os resultados mostram que para os eventos estudados a uma probabilidade alta de ruptura.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Determinístico, Avaliação Probabilística, Monte Carlo

1 INTRODUÇÃO

1.1 Estabilidade de taludes

O processo de ocupação da natureza pelo homem e o crescimento da população impõem cada vez mais o aproveitamento do solo para a ocupação de obras civis. O processo de escavação, na maioria dos casos, não é o processo final de um projeto, mas um meio para concluí-lo sendo preciso levar em conta um determinado nível de segurança, medido geralmente pela obtenção de um Fator de Segurança (FS).

Segundo a Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1998), a execução de cortes nos maciços pode condicionar movimentos de massa ou, mais especificamente, escorregamentos de taludes, caso as tensões cisalhantes ultrapassem a resistência ao cisalhamento dos materiais, ao longo de determinadas superfícies de ruptura (Marangon, 1998).

Segundo Machado (2001), geralmente a avaliação da estabilidade de diversas estruturas é feita com o uso de conceitos determinísticos. Estes conceitos são baseados em fatores de segurança julgados adequados à natureza da obra, onde o fator de segurança unitário indica uma ruptura iminente. Contudo, qualquer análise realizada apresentará incertezas sobre os resultados obtidos, seja em função dos modelos utilizados, que geralmente constituem simplificações da realidade, seja em função dos parâmetros que alimentam esses modelos, que carregam consigo uma variabilidade intrínseca decorrente da heterogeneidade do material estudado.

Nas análises de estabilidade de taludes as incertezas também são muito importantes, pois o solo, ao contrário de outros materiais de construção, possui um processo de formação natural que torna suas propriedades altamente dependentes dos processos geológicos atuantes em sua gênese (Costa, 2005).

1.2 Métodos Determinísticos

As análises determinísticas de estabilidade de taludes, usadas comumente na geotecnia, são baseadas em métodos de equilíbrio limite (Bishop, 1955; Spencer, 1967; Morgenstern-

Price, 1965; Janbu, 1973). Estes métodos consideram as melhores quantificações dos parâmetros de entrada (valores médios). O fator de segurança (FS) obtido deve ser suficiente para garantir a segurança, mas é de fato conhecido que este tipo de análise não leva em consideração as incertezas devido à natureza heterogênea do solo e a variabilidade dos eventos que podem ocorrer.

1.3 Métodos Probabilísticos

Eventualmente é possível determinar a probabilidade de ocorrência do processo de ruptura e suas conseqüências ou danos. A probabilidade de ruptura é correlacionada com o valor médio do fator de segurança e seu desvio padrão (σ). Na literatura são reconhecidos vários métodos para esta finalidade, por exemplo, o Método das Estimativas Pontuais, Rosenbleuth, Método FOSM e o método de Monte Carlo. Com o desenvolvimento atual da tecnologia, é relativamente fácil rodar este tipo de análise com a utilização de códigos computacionais. É importante que o usuário leve em conta o custo computacional do processo de cálculo na decisão de que metodologia probabilística a utilizar.

O método de Monte Carlo apresenta a possibilidade de transformar, com um grau de elegância, uma metodologia determinística em uma metodologia de natureza estocástica, que é considerada uma abordagem mais racional (Quevedo & Martínez, 2011).

O método de Monte Carlo resulta em uma curva de frequência de resultados obtidos a partir de distribuições (normais) de probabilidade das variáveis independentes. O processo de cálculo pode se tornar complexo pela grande quantidade de operações matemáticas que são necessárias.

2 METODOLOGIA

2.1 Localização do Problema

A obra analisada, Talude Norte do Kurthotel, localiza-se ao sul do centro da Ilha de Cuba na zona de montanhas da província Sancti Spiritus. Em 1985 registrou-se uma ruptura de tipo local no talude norte que inutilizou alguns serviços

do hotel. Decidiu-se então realizar uma correção da geometria preenchendo a falha com materiais locais mal compactados sem eliminar as causas do problema.



Figura 1. Localização do Talude Norte Kurthotel, Cuba. Fonte: Google Maps.

Nas décadas seguintes os mesmos problemas continuaram com velocidade de deslocamento pequena, segundo a classificação de Varnes, referenciada por (Marangon, 1998) e ilustrada na Figura 2.

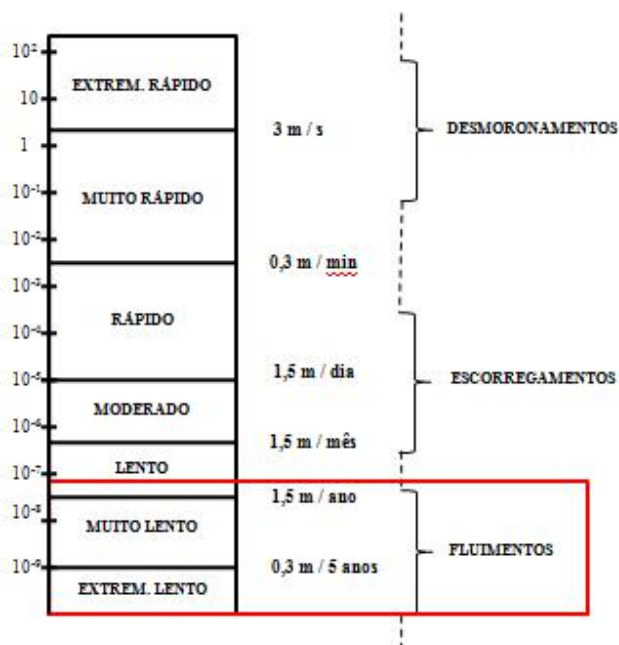


Figura 2. Escala de velocidade de Varnes para classificação dos deslocamentos de terra. Fonte: (Marangon, 1998 modificado).

A continuidade dos problemas sugere que suas causas não haviam sido bem identificadas nem resolvidas. Muitos estudos foram feitos até achar as causas das patologias apresentadas:

- Corte de árvores na área do talude;
- Vazamento de tubulações, aumentado a pressão de poros nos solos;
- Sismos perceptíveis na zona.

2.2 Antecedentes

Como antecedente a este trabalho destacam-se as investigações geotécnicas da área e o projeto de retificação do Talude Norte realizado (Chagoyen et al., 2000).

Neste trabalho são identificados os perfis mais críticos do talude e as causas da falha, calculou-se o fator de segurança pela metodologia determinística e foi projetada uma solução de estabilização por meio de uma cortina de estacas justapostas com diâmetro de 0,50 m e comprimento de até 6,5m. A figura 3 mostra um esquema de uns dos referidos perfis geotécnicos.

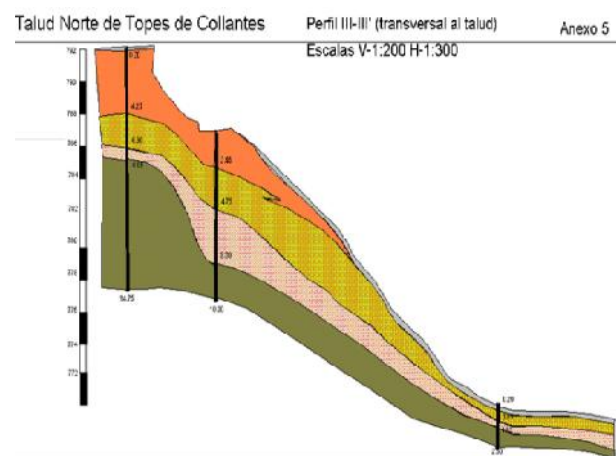


Figura 3. Perfil III-III Talude Norte. Kurthotel, Cuba. Fonte: (Chagoyen et al., 2000)

Apresentam-se na Tabela 1 os valores médios, o coeficientes de variação, e o desvio padrão de algumas propriedades dos solos da zona. Os valores de desvio padrão são calculados a partir dos coeficientes de variação encontrados em Assis (2000) que determina uma variação de 5% para o peso específico, 40% para a coesão e 10% para o ângulo de atrito.

Tabela 1. Valores médios e desvio padrão das propriedades mecânicas dos estratos.

Solo		γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Preenchimento	M	19.4	17	18
pedregulho silte e areia	s	0.97	6.8	1.8
Preenchimento	M	18.6	20	21
pedregulho argiloso	s	0.93	8	2.1
Silte argiloso com areia	M	18.45	18	22
	s	0.92	7.2	2.2
Silte arenoso (eluviação)	M	17.57	24	28
	s	0.87	9.6	2.8

M: Valor Médio, s: Desvio Padrão

2.3 Cálculo de Fator de Segurança por metodologia determinística.

Utilizou-se o software Geo-Slope 2007, inicialmente para calcular o fator de segurança determinístico para três condições : solo natural (úmido), solo saturado e ação de sismo em adição na condição de solo natural. A condição saturada foi simulada fazendo com que o nível freático coincidisse com a superfície superior do talude. A condição de sismo foi simulada aplicando-se forças horizontais com uma fator de 0.04 % do peso de cada fatia. Este valor foi calculado atendendo aos critérios da norma cubana de construções resistentes ao sismo (NC 46-1999).

Foram analisados 3 perfis, um dos quais é ilustrado na Figura 3. Os métodos utilizados foram: Fellenius (ordinary), Bishop, Janbu e Morgenstern-Price. Neste tipo de análise os dados utilizados são geralmente valores médios, mas nem sempre estes dados são os mais representativos, devido a incertezas principalmente na composição dos solos. São mostrados na Tabela 2 os resultados do método de Morgenstern-Price por apresentar os valores mais baixos de segurança e por atender simultaneamente às condições de equilíbrio de forças e momentos.

Tabela 2. Fator de Segurança. Método de Morgenstern-Price

Perfil	Condição	FS
Perfil III-III	Solo úmido	2.483
	Solo saturado	1.308
	Sismo	2.218
Perfil IV-IV	Solo úmido	1.249
	Solo saturado	0.771
	Sismo	1.152
Perfil V-V	Solo úmido	1.251
	Solo saturado	0.791
	Sismo	1.162

Os perfis IV-IV e V-V rompem na condição de talude saturado e quando é analisada a ação de sismo o fator de segurança diminui consideravelmente, reproduzindo o que aconteceu na obra analisada. Essa é uma maneira de validar a análise feita e comprovar o estudo anterior.

3 ANALISE PROBABILISTICA

Com a metodologia probabilística é possível conhecer além do fator de segurança do talude a

distribuição da probabilidade de ruptura a partir do cálculo das variações dos dados de entrada. Neste estudo são mantidas constantes as condições do talude (úmido, saturado ou sob ação de sismo) e varia-se somente as propriedades dos solos dos estratos. Só são analisadas apenas estas duas últimas condições as quais levaram os taludes à ruptura. Ressalta-se também que a probabilidade de falha será calculada para vários períodos de retorno pela ausência de dados históricos.

3.1 Análises da convergência dos modelos analisados

A análise de convergência é feita para determinar o número de rodadas necessárias para estabilizar numericamente o resultado do Método de Monte Carlo. No geral não se deve analisar apenas o FS médio como variável de controle, sendo também necessário analisar a convergência do desvio padrão. Estes resultados são apresentados graficamente nas figuras 4 e 5, respectivamente.

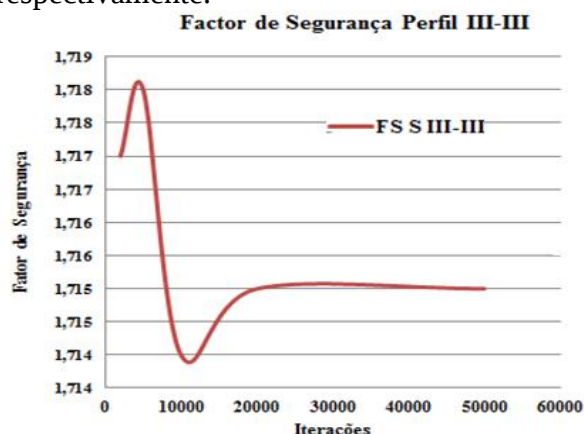


Figura 4. Convergência do Fator de segurança Perfil III-III condição de solo úmido.

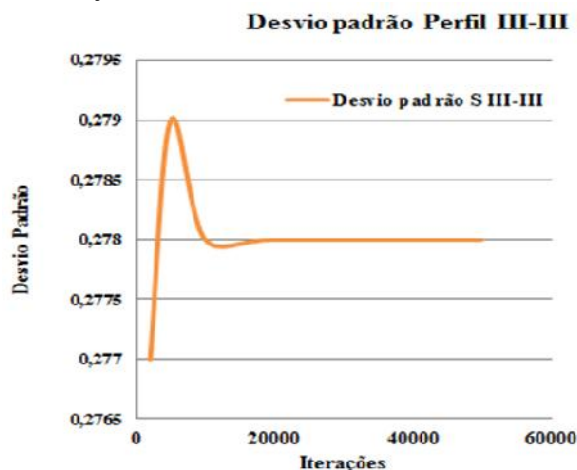


Figura 5. Convergência do desvio padrão Perfil III-III condição de solo úmido.

As análises de convergência serão feitas sempre que mudem as condições do problema, no caso atual é feito para cada perfil e cada mudança de condição de carregamento do solo. Para todos os casos, a constância do Fator de Segurança foi atingida com cerca de 20000 simulações, enquanto que o desvio padrão se estabilizou para cerca de 10000 simulações. Os valores convergidos são apresentados na Tabela 3. Os valores na tabela correspondem ao análise do talude sem a obra de estabilização projetada e são calculado pelos critérios do método Morgenstern-Price.

Tabela 3. Resultados do análise probabilística Fator de Segurança. Método de Morgenstern-Price.

Perfil	Condição	Variável	Resultado	Iterações
Perfil III-III	Solo úmido	FS	1.715	20000
		σ	0.267	10000
	Solo saturado	FS	1.159	10000
		σ	0.25	10000
	Sismo	FS	1.585	10000
		σ	0.201	10000
Perfil IV-IV	Solo úmido	FS	1.2	20000
		σ	0.156	10000
	Solo saturado	FS	0.733	10000
		σ	0.138	10000
	Sismo	FS	1.098	10000
		σ	0.145	10000
Perfil V-V	Solo úmido	FS	1.248	10000
		σ	0.169	20000
	Solo saturado	FS	0.777	20000
		σ	0.156	10000
	Sismo	FS	1.197	10000
		σ	0.181	10000

3.2 Cálculo da probabilidade de falha

A curva de frequência dos fatores de segurança seguiu uma distribuição normal, como se vê na Figura 6. As distribuições normais dos fatores de segurança permitem calcular as probabilidades de ruptura, mas o software utilizado não leva em conta o período de retorno. O período de retorno é o intervalo de

tempo estimado de ocorrência dos eventos analisados. A definição de este parâmetro estatístico permite calcular a probabilidade de ruptura da obra dividindo a probabilidade de falha extrema calculado pelo software entre o período de ocorrência do evento.

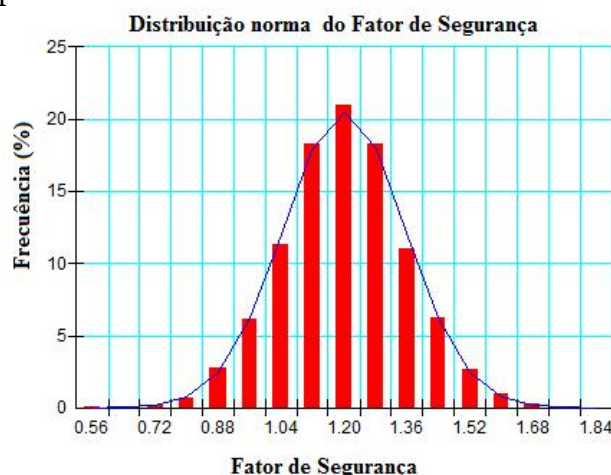


Figura 6. Distribuição normal de Fator de segurança. Perfil IV-IV condição de solo úmido.

Os períodos de retornos são determinados a partir da probabilidade de ocorrência de eventos extremos estimados de dados históricos, tendo-se aqui adotado os períodos de 5, 10 e 50 anos. No caso da chuva extrema que pode levar o talude à condição de solo saturado foi estimada a partir da frequência de furacões de grande intensidade, pois a região é muito afetada por este tipo de condição meteorológica. Os mesmos períodos de retorno foram adotados para o caso da ocorrência de sismo, por falta de dados mais precisos. Na tabela 4 são apresentados as probabilidades de ruptura para os perfis aqui analisados.

Tabela 4. Cálculo das probabilidades para vários períodos de retorno

Perfil	Condição	Probabilidade e de Falha Calculada (%)	Período de Retorno (Anos)	Probabilidade e de Falha (%)	Período de Retorno (Anos)	Probabilidade e de Falha (%)	Período de Retorno (Anos)	Probabilidade e de Falha (%)
Perfil III-III	Solo	22,63	5	4,53	10	2,263	50	0,4526
	Saturado	48,97	5	9,79	10	4,897	50	0,9794
Perfil IV-IV	Solo	85,78	5	17,16	10	8,578	50	1,7156
	Saturado	74,82	5	14,96	10	7,482	50	1,4964
Perfil V-V	Solo	81,99	5	16,40	10	8,199	50	1,6398
	Saturado	71,8	5	14,36	10	7,18	50	1,436

3.3 Cálculo do fator de segurança e probabilidade de ruptura para a solução projetada

O projeto de estabilização proposto incluiu correções na geometria do talude e a construção de uma cortina de estacas justapostas com as referidas dimensões, como ilustrado na Figura 7. O espaçamento entre as estacas foi definido na faixa de 3 até 7 vezes o diâmetro da mesma. Para o análise foi considerado um espaçamento de 2m, uma resistência ao cisalhamento de 200 kN. É considerada a tensão cisalhante paralela a superfície de ruptura. Nesta seção analisa-se a solução proposta com as mesmas condições extremas para verificar sua eficácia.

A Tabela 5 os acréscimos relativos no fator de segurança e desvio padrão convergidos. Além da variação numérica de FS é importante notar que também ocorre uma mudança na superfície de ruptura.

Na Figura 7 se mostra como ocorre à mudança de superfície crítica, a qual foi traslada para outra posição em relação à inicial. Caso no futuro se deseje projetar áreas de crescimento das instalações do hotel, os resultados mostram a necessidade de projetar outro tipo de obra para estabilizar o talude.

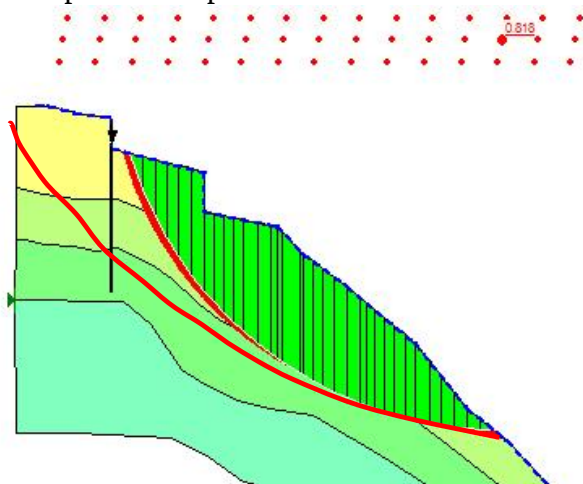


Figura 7. Mudança da superfície de falha. Perfil IV-IV condição de solo saturado.

Tabela5. Resultados do análise probabilística Fator de Segurança. Método de Morgenstern-Price para a solução projetada.

Perfil	Condição	Variável	Resultado	Varição
Perfil III-III	Solo	FS	2.056	19.9
	Úmido	s	0.476	78.3
	Solo	FS	1.474	27.2
	saturado	s	0.439	75.6
	Sismo	FS	1.829	15.4
		s	0.426	111.9
Perfil IV-IV	Solo	FS	1.296	8.0
	Úmido	s	0.183	17.3
	Solo	FS	0.819	11.7
	saturado	s	0.164	18.8
	Sismo	FS	1.196	8.9
		s	0.173	19.3
Perfil V-V	Solo	FS	1.293	3.6
	Úmido	s	0.193	14.8
	Solo	FS	0.831	6.9
	saturado	s	0.179	14.7
	Sismo	FS	1.197	2.7
		s	0.182	13.0

Na tabela 6 mostram-se os valores das probabilidades de ruptura para os diferentes períodos de retorno. Embora a solução proposta tenha melhorado a estabilidade, os resultados aqui apresentados demonstram que nas condições atuais ainda há uma probabilidade razoável de ruptura o que é muito importante considerar para projeto futuros.

Tabela 6. Cálculo das probabilidades para vários períodos de retorno

Perfil	Condição	Probabilidad e de Falha Calculada (%)	Período de Retorno (Anos)	Probabilid ade de Falha (%)	Período de Retorno (Anos)	Probabilidad e de Falha (%)	Período de Retorno (Anos)	Probabilidade de Falha (%)
Perfil III-III	Solo Saturado	14.34	5	2.868	10	1.434	50	0.2868
	Sismo	2.51	5	0.502	10	0.251	50	0.0502
Perfil IV-IV	Solo Saturado	85.96	5	17.192	10	8.596	50	1.7192
	Sismo	12	5	2.4	10	1.2	50	0.24
Perfil V-V	Solo Saturado	82.9	5	16.58	10	8.29	50	1.658
	Sismo	13.58	5	2.716	10	1.358	50	0.2716

4 CONCLUSÕES

Foram analisadas as três seções consideradas críticas pelos anteriores estudos realizados para a obra abordada. Os taludes foram analisados com o método determinístico e com método probabilístico de Monte Carlo. O cálculo do fator de segurança foi feito utilizando o programa Geo-Slope 2007 para os métodos de Bishop, Fellenius, Janbu e Morgenstern-Price, apresentando-se sempre os resultados deste último por serem considerados mais exatos.

Foram analisadas condições de carregamento de talude saturado e sismo, as quais seriam as condições críticas responsáveis pela ruptura do talude.

O desvio padrão de cada variável envolvida no problema, devido à falta de dados, foi calculado partir dos valores dos coeficientes de variação encontrados na literatura, o que pode alterar os resultados obtidos.

Demonstra-se que a partir das 10.000 iterações não existem mudanças significativas nos resultados de fator de segurança médio calculado com o Método de Monte Carlo. Isto é muito importante levar em conta, para avaliar o custo computacional e definir o método probabilístico a utilizar.

Dentre os cortes analisados, o Perfil III-III é classificado como o menos crítico, mas a

solução projetada ainda apresenta uma probabilidade de falha muito alta, demonstrando que as causas do problema não foram totalmente resolvidas, caso ocorram os eventos extremos aqui analisados.

5 REFERÊNCIAS

- Assis, A. P. (2002). *Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia*. Apostila: Publicação G.AP-002/01. Brasília.
- Barbetta, P. A., Reis, M. M., & Bornia, A. C. (2009). *Estatística: para cursos de engenharia e informática*. São Paulo: Editora Atlas, 2 ed., 2. reimpr.
- Chagoyen, E., Lima, R., Recarey, C., & Oliva, A.O. (2000). *Corrección de los Defectos del Talud Norte* (Kurthotel).
- Costa, E.A. (2005). *Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes*. Universidade federal do rio grande do sul.
- Machado, L.S. (2001). *Estudo estatístico de parâmetros de resistência de um solo residual de granulito*. Rio de Janeiro, 345–353.
- Marangon, M. (1998). *Estabilidade de taludes. Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra*, pp. 1–25.
- NC 46. (1999). *Construcciones sismorresistentes. requisitos básicos para el diseño y construcción*: 75.
- Quevedo, G. & Martínez, A. (2011). *Análisis estocástico y diseño probabilista en la geotecnia. aplicación al diseño geotécnico de cimentaciones superficiales en suelos cohesivos*. Rev. la Construcción, 10 No 1: 15–23.